

共同研究
3次元免震床の性能確認に関する研究
報告書

平成 26 年 3 月

新潟工科大学

目 次

1	共同研究の概要	1-1
1.1	共同研究の背景と方針	1-1
1.2	研究の内容	1-1
2	3次元免震床の各装置	2-1
2.1	3次元免震床の概要	2-1
2.2	各装置の説明	2-3
3	水平方向の加力実験	3-1
3.1	加力、測定機器及び測定システム	3-1
3.2	加力用架台の作成	3-7
3.3	実験方法	3-13
3.3.1	加力方法	3-13
3.4	予備加力実験	3-17
3.4.1	免震床の全体の変形	3-17
3.4.2	復元力機構の変形	3-19
3.4.3	加力用架台の影響	3-22
3.5	荷重変位関係	3-25
3.5.1	水平方向の荷重変位変形	3-25
3.5.2	1方向加力(加力パターンA)	3-25
3.5.3	1方向加力(加力パターンB、加力パターンC)	3-37
3.5.4	2方向同時加力	3-47
3.5.5	1方向加力と2方向加力の免震床変位方向の荷重変位関係の比較	3-56
3.6	水平方向の加力実験のまとめ	3-59
4	3次元振動モデルによる地震応答解析	4-1
4.1	免震床の3次元振動解析モデル	4-1
4.2	2011年長野県北部地震の記録による解析モデルの妥当性検討	4-5
4.2.1	固定床の地震観測記録	4-5
4.2.2	免震床の地震観測記録と地震応答解析結果の比較	4-8

4.3	建物-免震床の一体型振動解析モデルの作成	4-20
4.3.1	建物-免震床一体型解析モデル	4-20
4.3.2	地盤ばねの設定	4-22
4.3.3	建物のモデル化	4-29
4.3.4	建物の固有周期	4-30
4.4	一体型モデルによる地震応答解析(2004年新潟県中越地震)	4-31
4.4.1	入力地震動	4-31
4.4.2	免震効果の確認	4-34
4.5	一体型モデルによる地震応答解析(2007年新潟県中越沖地震)	4-44
4.5.1	入力地震動	4-44
4.5.2	免震効果の確認	4-47
4.6	地震応答解析結果のまとめ	4-57
5	建物内に新たな加速度計の設置	5-1
5.1	目的	5-1
5.2	加速度計と設置位置	5.1
6	まとめ	6-1
	参考文献	参-1
	付録-A 水平方向加力実験結果	付 A-1
	付録-B マルチスプリング(MSS)要素について	付 B-1

1 共同研究の概要

1.1 共同研究の背景と目的

平成 18 年の耐震設計審査指針（新指針）の改定により原子力施設の剛構造規定が撤廃され、また、平成 19 年の新潟県中越沖地震や平成 23 年の東北地方太平洋沖地震では設計地震動を超える地震動が実際に発生した。特に、東北地方太平洋沖地震を受けた「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書」では確率論的安全評価手法（PSA）の重要性が記された（教訓 27）こともあり、原子力施設のリスク低減の一環として、事業者は免震構造を適用する可能性が増加している。

また、東北地方太平洋沖地震の知見から、緊急対策所等を免震構造化する動きも加速している状況のもと、新規制基準において、緊急時対策所は基準地震動に対し、免震機能等によりその機能を喪失しないようにすることが明確に要求された。

このような状況を受けて JNES では、事業者から地震荷重低減策として原子力施設に免震構造を適用した認可申請がなされた場合に備え、審査側として安全審査を厳正かつ的確に実施するための免震構造の審査手続きの整備を進めている。この審査手続きは、審査基準に係る本編に加え、技術的な説明や審査のポイント等の理解を高めるために免震構造の試設計例及び試評価例を補足している。

本研究は、昨年度までに実施した性能確認試験に基づく水平／鉛直方向別の解析を高度化し、免震構造審査手続きの試評価例に資することを目的とする。

1.2 研究の内容

3次元免震床の免震性能を以下の項目に従って確認する。水平方向について、H24 年度に実施した加力実験を発展させた床の長辺方向と短辺方向等の加力試験を行う。ここで確認した特性を反映して免震床の数値解析を実施する。

① 水平方向の静的加力試験

加力装置を用いて水平 2 方向（X 方向、Y 方向）等に加力^{*1}し、各方向の免震床の復元力特性を測定する。この復元力特性に基づき、以下の 5 項目について検討を行う。

- ・コイルばねの総定数
- ・コイルばねの予引張力
- ・摩擦力
- ・原点復帰特性
- ・斜め加力（H24 年度）との比較検討

② 数値解析

解析モデルを構築して、地震応答解析を行い、以下の項目について検討を行う。

- ・免震設計に反映できる 3 次元解析手法
- ・深部地震動観測記録に基づく免震床のシミュレーション解析^{*2}（地盤・建屋の影響及びそれらの相互作用を含む）

※1：加力試験のために反力架台を設置する。

※2：建屋・地盤の相互作用評価の精度向上のために加速度計を建屋床に設置する。

2. 3次元免震床の各装置

2.1 3次元免震床の概要

新潟工科大学原子力耐震・構造研究センターの3次元免震床は、図 2-1-1 に記すように各種機構から成り立っており、水平方向ではBSユニット、Sユニット、SAユニットが作用することにより減衰、原点復帰の役割を果たす。

水平方向には長辺、短辺方向共に 20cm 程度のクリアランスが設けられている。

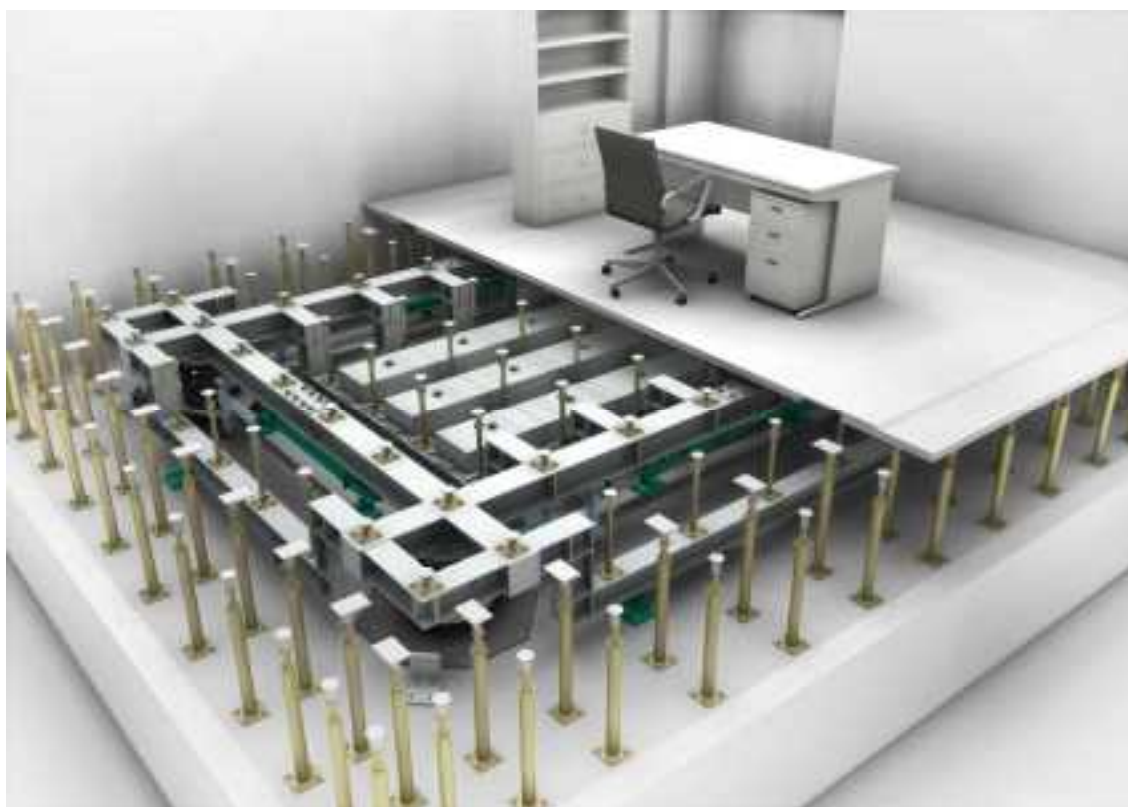


図 2-1-1 免震床全体 イメージ CG

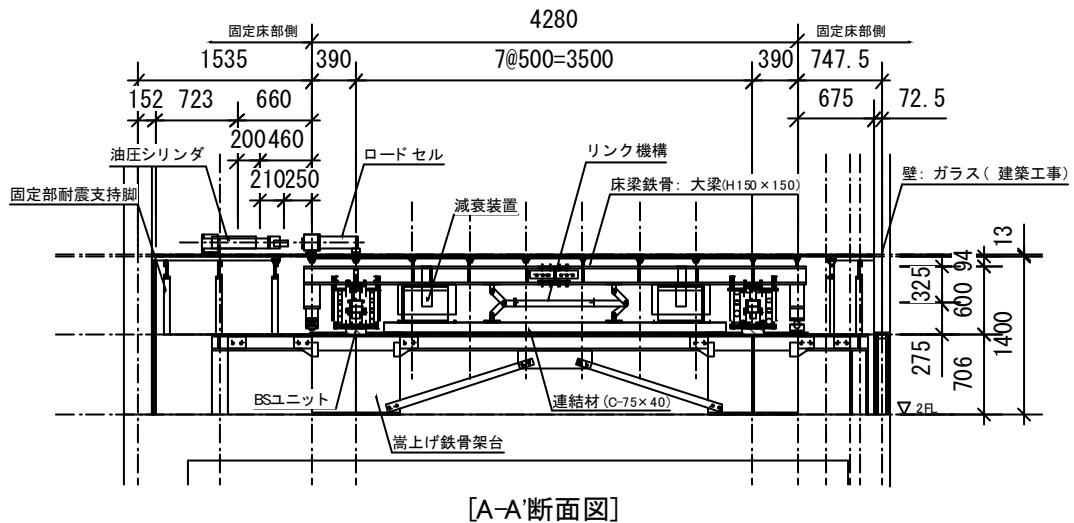
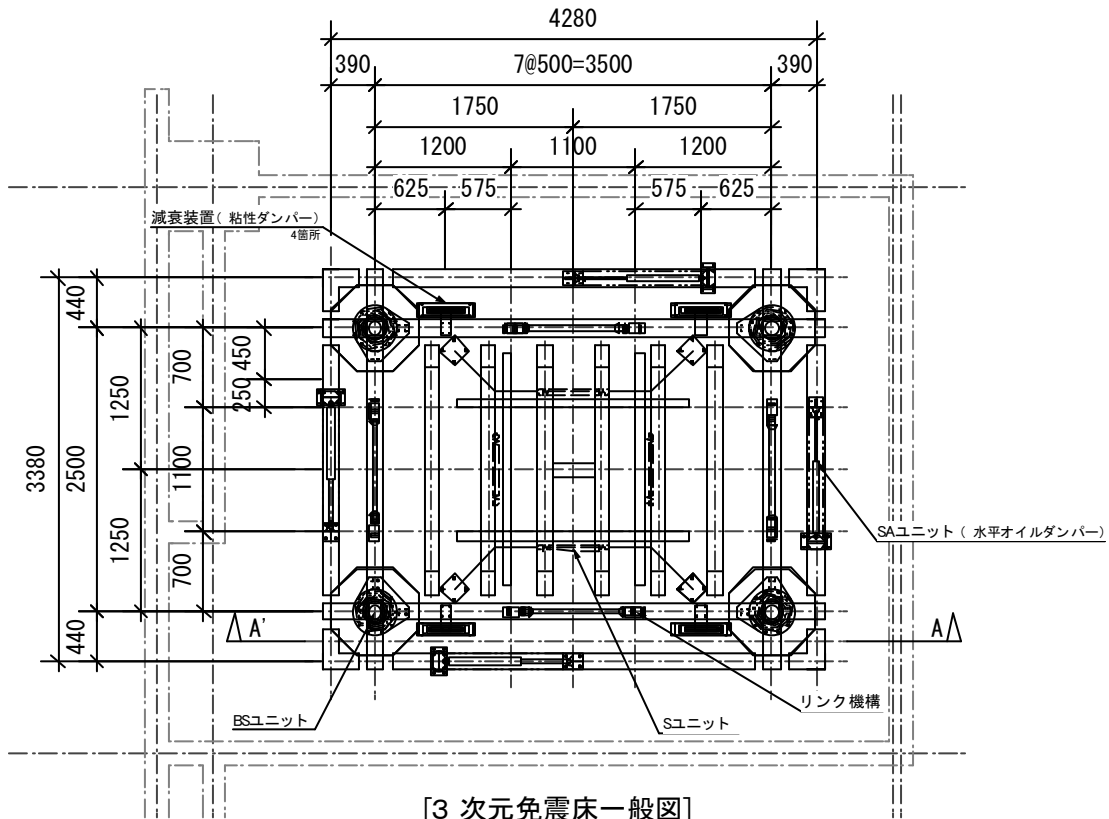


図 2-1-2 3次元免震床図面

(免震床周辺には 20cm 程度のクリアランスが設けられている)

2.2 各装置の説明

1) BSユニット（支承機構）

支承機構はコイルばね、油圧シリンダーと底部のベアリングから構成されており、床の荷重を支える役割も果たしている。

水平方向に対しては、**図 2-1-4** に示す支承底部のベアリングが支持板上を転がり、滑ることにより長周期化を実現させている。



図 2-1-3 BS ユニット



図 2-1-4 底部ベアリング イメージ CG

2) Sユニット（復元機構）

復元機構は、引張コイルばねと取付け治具をそれぞれ土台と床に固定されている。小さな地震動では作動しないように4本のばねには予引張力（プレテンション）が導入されているが、復元機構により地震による変形を受けた免震床を元の位置に復元（原点復帰）させる。

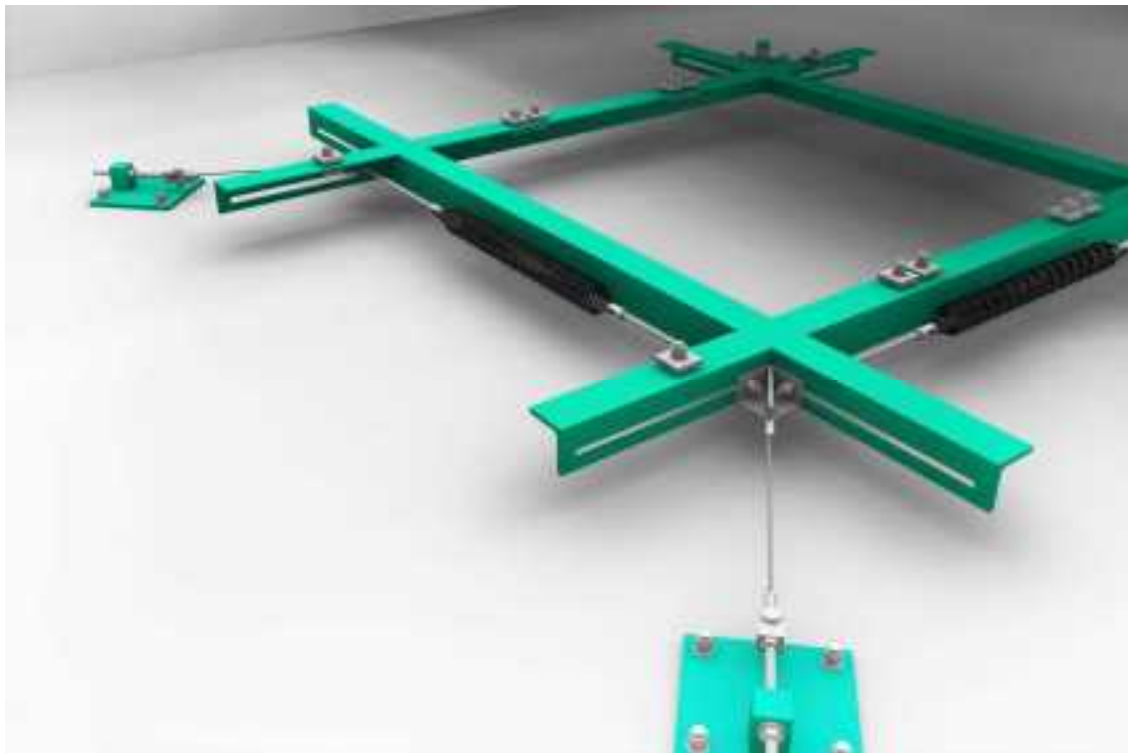


図 2-1-5 Sユニット イメージCG



図 2-1-6 Sユニット（下から）

3) SAユニット（減衰機構）

減衰機構はオイルダンパーの両端をそれぞれ固定床、免震床に取り付け治具で固定されており、両端ともピン接合である。本免震床では長辺、短辺方向各2本ずつ、計4本設置されている。

オイルダンパーの抵抗により地震時の建物と免震床の間に生じる水平相対変位を小さくすることができる。

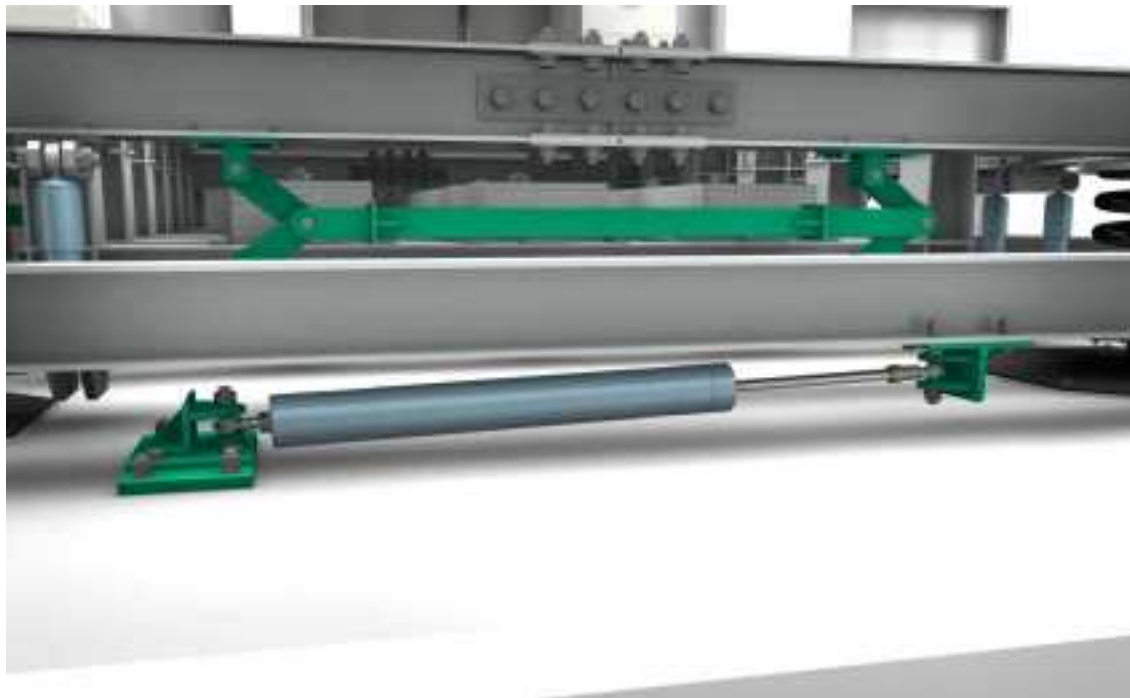


図 2-1-7 SAユニット イメージCG

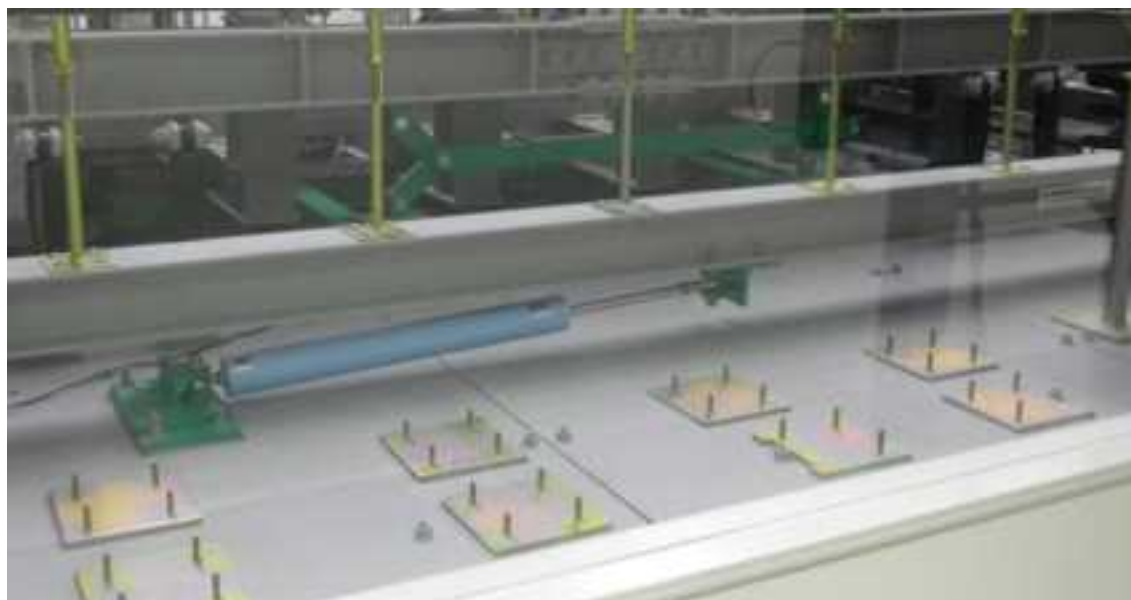


図 2-1-8 SAユニット

4) 減衰機構

鉛直方向の減衰機構として4個の粘性ダンパーが設置されている。設置位置は免震床の4辺それぞれに一つ設置されている。この粘性ダンパーは粘性シリコンを材料とし、粘性体の温度によって免震性能が変わってくる。

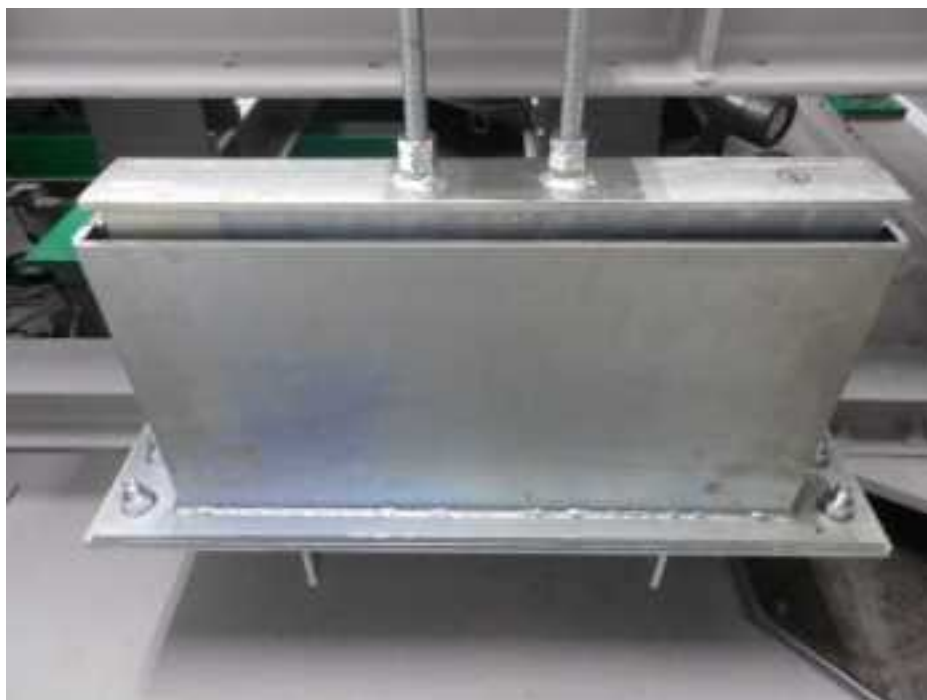


図 2-1-9 鉛直減衰機構

5) リンク機構

リンク機構は、床面のロックイング振動等を防止し、床面を均一に振動にさせる機能を持っている。



図 2-1-10 リンク機構

3 水平方向の加力実験

3.1 加力、測定機器及び測定システム

(1) 加力、測定機器

図 3-1-1, 3-1-2 に仕様を示す油圧シリンダ及び手動ポンプを 2 セット用いた。

シリンダは MD05-250 であり、最大ストローク変位 250mm、最大荷重 50kN であるが、本実験の荷重範囲を考慮し、手動ポンプの圧力弁に手を加え、最大出力 70MPa を 10MPa とすることにより、最大荷重の上限が 1/7 (7.14kN) となるようにしている。

使用したロードセル (NCA-10KNA) の仕様を図 3-1-3 に示す。荷重容量は 10kN である。

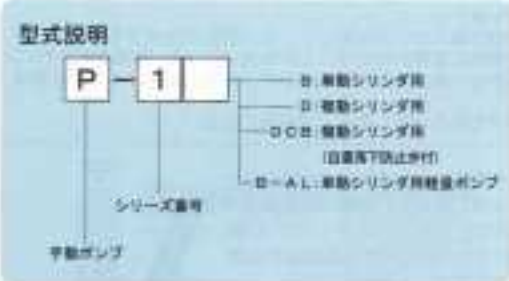
使用した変位計 (DP-500E, DP-1000E) の仕様を図 3-1-4 に示す。ワイヤ巻き込み式の変位計で、容量は 500mm と 1000mm の変位計を各 2 台使用した。

手動ポンプ

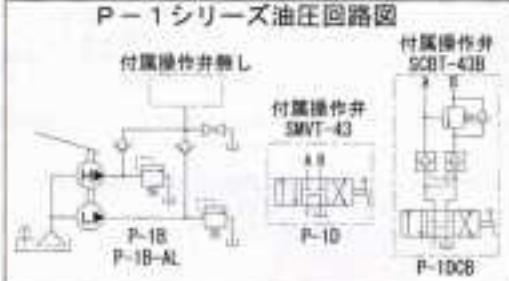
■ P-1 シリーズ

※P-100B は受注生産となります。


型式説明




P-1 シリーズ油圧回路図



P-1B



P-1B-AL



仕様

型式	最高使用圧力 MPa		吐出量 cm ³ /ストローク		吐出 口径 Rc	タンク 油量 cm ³	有効 油量 cm ³	レバー 荷重 kg	概略 質量 kg	付属 操作弁
	高圧	低圧	高圧時	低圧時						
P-1B	70	2	2.3	13.0	3/8	700	600	54.5	7.0	-
P-1D									9.0	SMVT-43
P-100B									11.0	SCBT-43B
P-1B-AL									4.8	-

図 3-1-1 手動ポンプの仕様 (P-1D を使用)

複動シリンダ MDシリーズ

型式説明

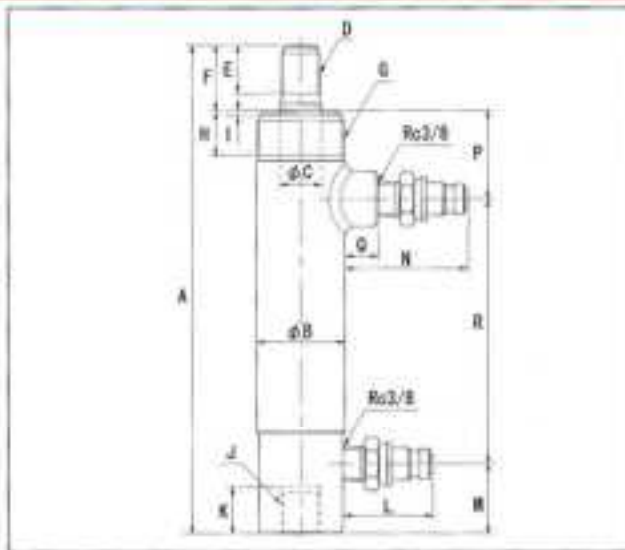
MD 05 - 50

最大出力 0.5 50kN

付属カップラ 種類: R0C-13R
S: S-1R
NC: カップラ無し

MDシリーズ ストローク(mm)

●ピストンメッキ付き



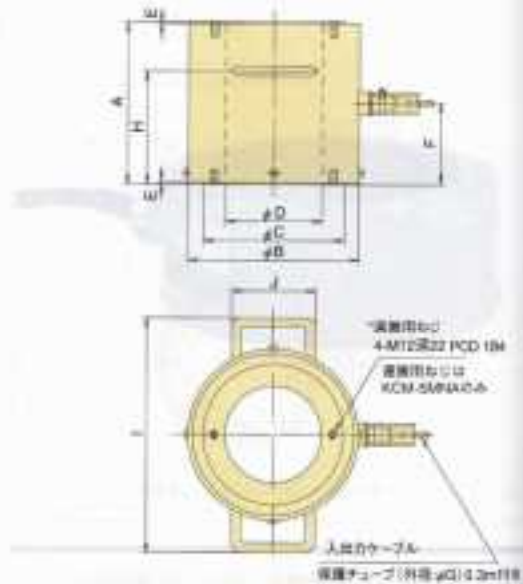
■仕様

型 式	MD05-50	MD05-75	MD05-100	MD05-150	MD05-200	MD05-250	
最高使用圧力	MPa 70						
伸 側	最大出力	kN 50					
	受圧面積	cm ² 7.16					
引 側	最大出力	kN 23.4					
	受圧面積	cm ² 3.36					
ストローク	mm 50	75	100	150	200	250	
最小全長	A 159	254	279	329	379	429	
シリンダ内径	φ 30.2						
シリンダ外径	φB 46						
ピストン径	φC 22						
ピストンねじ径	D M20×1.5						
ピストンねじ長	E 25						
ピストン突出長	F 34						
カラーねじ径	G M45×1.5						
カラーねじ長	H 23						
ねじにがし長さ	I 3						
ベースねじ径	J M20×1.5						
ベースねじ深さ	K 24						
伸 側	カップラ突出長	L ≒65 (注)					
	カップラ外径	M 20 36					
引 側	カップラ突出長	N ≒65		O ≒68			
	カップラ外径	P 46					
ボ ス 径	Q 17			R 19			
ポート間距離	R 59	138	163	213	263	313	
カップラ接続口径	Rc3/8						
付属カップラ	R0C-13R						
必要油量	cm ³ 36	54	72	108	144	179	
総重量	kg 1.9	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	

(注) MD05-50のみ伸側ポートにもボスがあります。

図 3-1-2 油圧シリンダの仕様 (MD05-250 を使用)

KCM-NA 圧縮センターホール型荷重計 10kN~5MN



円筒形の起座部にひずみゲージを取付けた荷重計です。用途としては主にPC破壊やアースアンカの破壊力の測定、引抜き試験、タイロッドの軸力測定などに使用されています。とくに現場での測定に最適です。

在庫等場 IP 67相当

- 特長
- 防滴構造
- 小型で取扱いが簡単

型名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	質量(kg)
KCM-10KNA	50	50	18	15	1	29	26	-	-	-	0.5
KCM-20KNA	50	50	18	15	1	29	26	-	-	-	0.5
KCM-50KNA	50	50	22	15	1	29	26	-	-	-	0.8
KCM-100KNA	60	60	30	20	1	33	26	-	-	-	1.1
KCM-200KNA	70	70	44	30	1	35	26	-	-	-	1.4
KCM-300KNA	80	85	53	35	1	40	26	-	-	-	2
KCM-600KNA	80	100	65	40	1	40	26	-	-	-	2.8
KCM-1MN	120	130	94	60	2	60	33	-	-	-	6.2
KCM-2MN	160	170	135	80	2	80	33	110	234	124	16
KCM-3MN	165	205	160	115	2	97.5	33	130	285	124	25
KCM-5MNA	250	265	218	150	2	125	33	175	365	150	58

■仕様

型名	KCM-10KNA	KCM-20KNA	KCM-50KNA	KCM-100KNA	KCM-200KNA	KCM-300KNA	KCM-600KNA	KCM-1MN	KCM-2MN	KCM-3MN	KCM-5MNA
容量	10kN	20kN	50kN	100kN	200kN	300kN	600kN	1MN	2MN	3MN	5MN
出力基準	1.02H	2.04H	5.10H	10.20H	20.40H	30.60H	51.0H	102H	204H	306H	510H
定額出力	1.5mV/300H(±0.5%)±0%						1.5mV/V(3000X10 ⁻¹⁰ ずみ)±10%				
非直線性	0.5%RO						1%RO				
ヒステリシス	0.5%RO						1%RO				
零点の温度特性	0.1%RO/C						0.05%/C				
出力の温度特性	-10~+60°C						-25~+70°C				
許容温度範囲	100%						10V以下				
許容過電圧	20V						5%RO				
電バランス	±0.5mm 0.5mmφ 4心シールドクロロレンケーブル 5m 先端ばら線										

上記の他、特注品も製作致しますのでご相談ください。

図 3-1-3 ロードセルの仕様 (KCM-10KNA を使用)

DP-E 巻込型変位計 500~2000mm

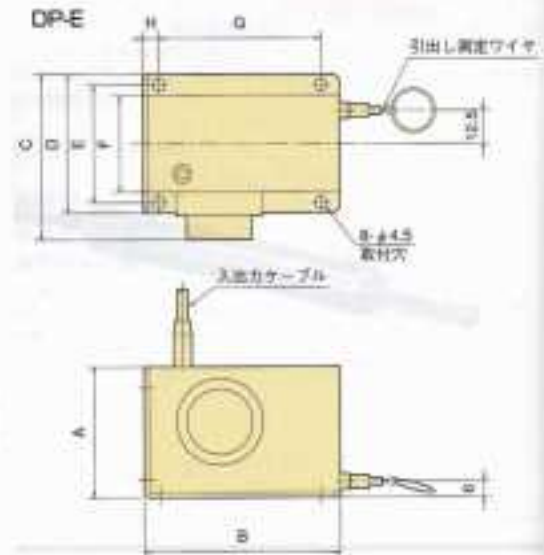


大きな変位を測定するための変位計です。測距はステンレスワイヤの引出しで行いますが、ワイヤの張力は変位量にかかわらず一定です。小型軽量で高精度な変位計です。

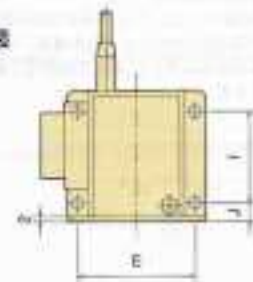
保護等級 IP40相当

■特長

- 小型軽量
- 大きな変位の測定が可能
- ワイヤの張力が一定
- 取扱いが簡単



右側面図



型名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	質量(g)
DP-500E	50	75	63	53	45	37	62	6	35	7	210
DP-1000E	50	75	63	53	45	37	62	6	35	7	210
DP-2000E	80	98	67	57	49	41	74	10	53	18	400

■仕様

型名	DP-500E	DP-1000E	DP-2000E
容量 (mm)	500	1000	2000
定格出力	5mW (10000X10 ⁻¹⁰ ずみ) ±0.3%		
感度 (X10 ⁻¹⁰ F/Am)	20	10	5
非直線性	0.3%RO		
測定力	約1.5N (150gf)		約1.7N (170gf)
許容温度範囲	-10~+60℃ (結露しない事)		
入出力抵抗	入力約210Ω 出力約380Ω		
推奨印加電圧	2V以下		
許容印加電圧	10V		
付属ケーブル	CTS-4V10FM-STB (φ6mm 11.3mm ² 4心シールドビニールケーブル 10m 先端ばら線)		

図 3-1-4 変位計の仕様 (DP-500E, DP-1000E を使用)

(2) 測定システム

計測システムの概要を図 3-1-5 に示す。ロードセル(2 台、10kN)による荷重とシリンダヘッドの変位計測用の変位計(2 台、500mm)は外付けのアンプ(全 4ch)を通し、シリンダヘッド計測用の変位計(2 台)による変位は、アンプ出力をデータロガーと収録装置の 2 系統に分岐させ、データロガーに表示される変位表示は、油圧ポンプ操作者の加力制御に利用した。加力方向の免震床変位の計測用変位計(1000mm)は、直接、収録装置に接続した。表 3-1-1, 表 3-1-2 に構成係数について示す。

また、計測は 10H(0.1s)間隔で実施し、保存するものとした。

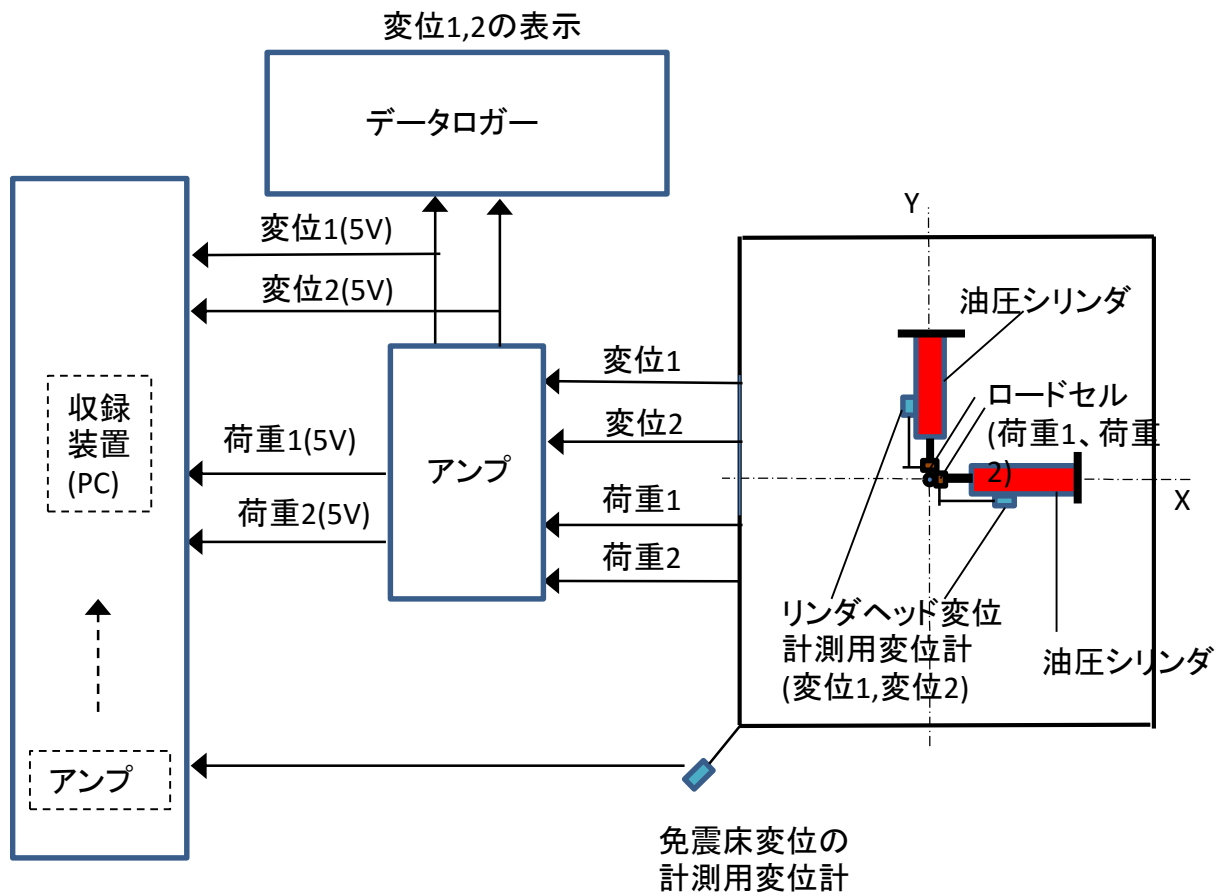


図 3-1-5 計測システムの概要

表 3-1-1 収録装置での校正係数

CH		校正係数	備考
A-05	免震床の変位 1(1000mm)	0.1	容量(1000mm)、容量(10000)
A-06	免震床の変位 2(1000mm)	0.1	容量(1000mm)、容量(10000)
A-28	シリンダヘッドの変位 1(500mm)	100	5V → 500mm
A-29	シリンダヘッドの変位 2(500mm)	100	5V → 500mm
A-30	荷重 1(10kN)	2	5V → 10kN
A-31	荷重 2(10kN)	2	5V → 10kN

表 3-1-2 外付けアンプでの校正係数

CH		校正係数	備考
1	荷重 1(10kN)	0.0033	容量(10kN)、容量(3000)
2	シリンダヘッドの変位 2(500mm)	0.05	容量(500mm)、容量(10000)
3	シリンダヘッドの変位 1(500mm)	0.05	容量(500mm)、容量(10000)
4	荷重 2(10kN)	0.0033	容量(10kN)、容量(3000)

3.2 加力用架台の作成

免震床の周辺スペースには、実験のための反力フレームなどを設置する余裕ないので、加力用の架台を免震床の上方に設けて、加力用反力は免震床中央付近を通過している建物小梁(RC造)から取るように計画した。

加力架台の全景及び油圧シリンダ設置状況の写真を図3-2-1、図3-2-2に示し、設計図面を図3-2-3～7に示す。加力架台はシリンダが免震床の重心(剛心)に荷重を加えられるように設計し、X,Y同時加力を可能にするために、X(+方向とY(+方向の加力点にローラー(ガイドレール)を設置し、加力と直行方向にも移動できるようにしている。

また、加力架台を設置するにあたり、その重量分(約700kgf)を免震床に設置されているおもりから除くことにより、架台設置後の免震床重量は設置前と変わらずに5tonfとなるように調整している。



図 3-2-1 加力用架台の全景



図 3-2-2 油圧シリンダの取り付け

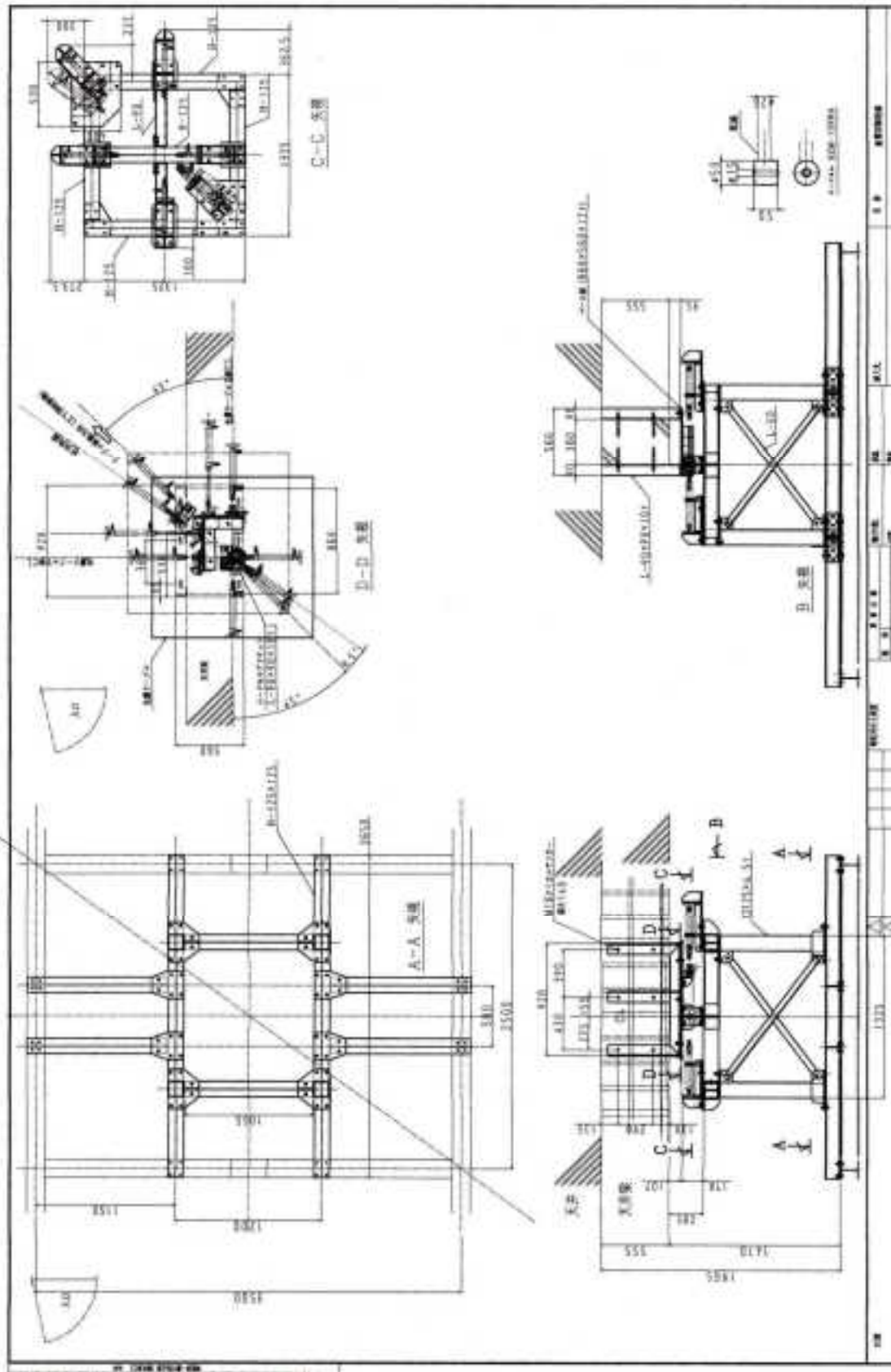


图 3-2-3 加力用架台全体图

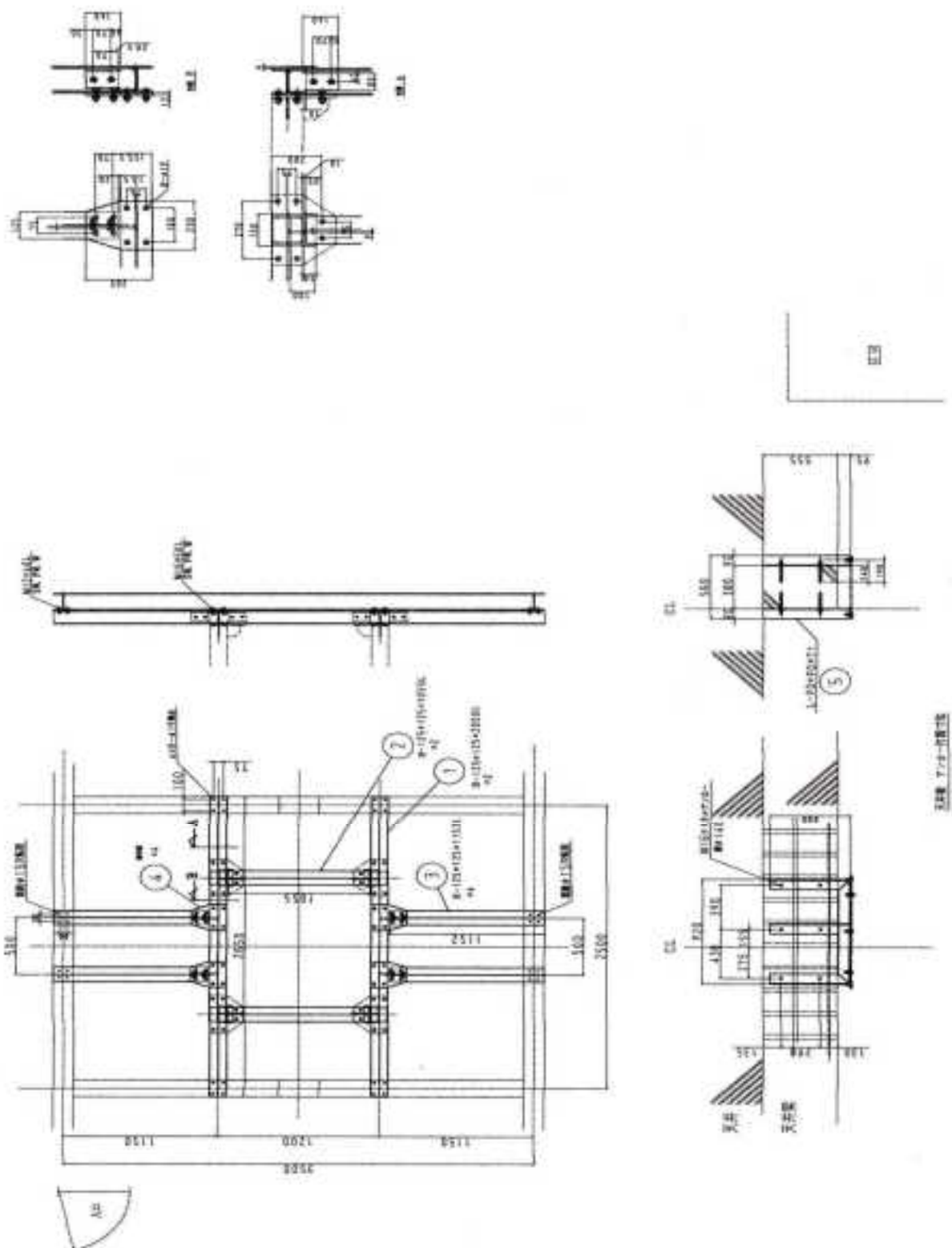


図 3-2-4 ベース梁、アンカー部

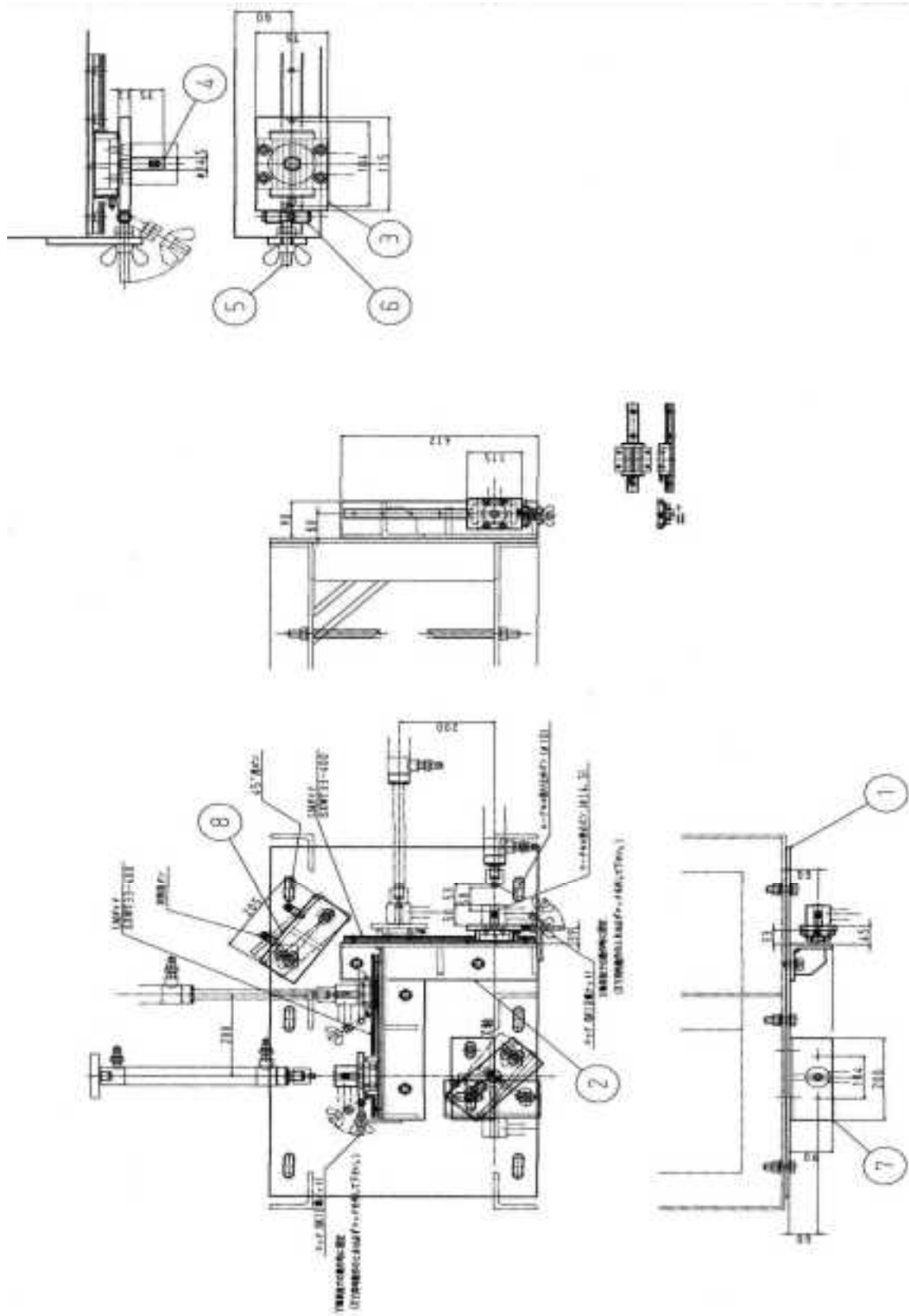


図 3-2-6 X=Y 軸ロードセル取り付け部

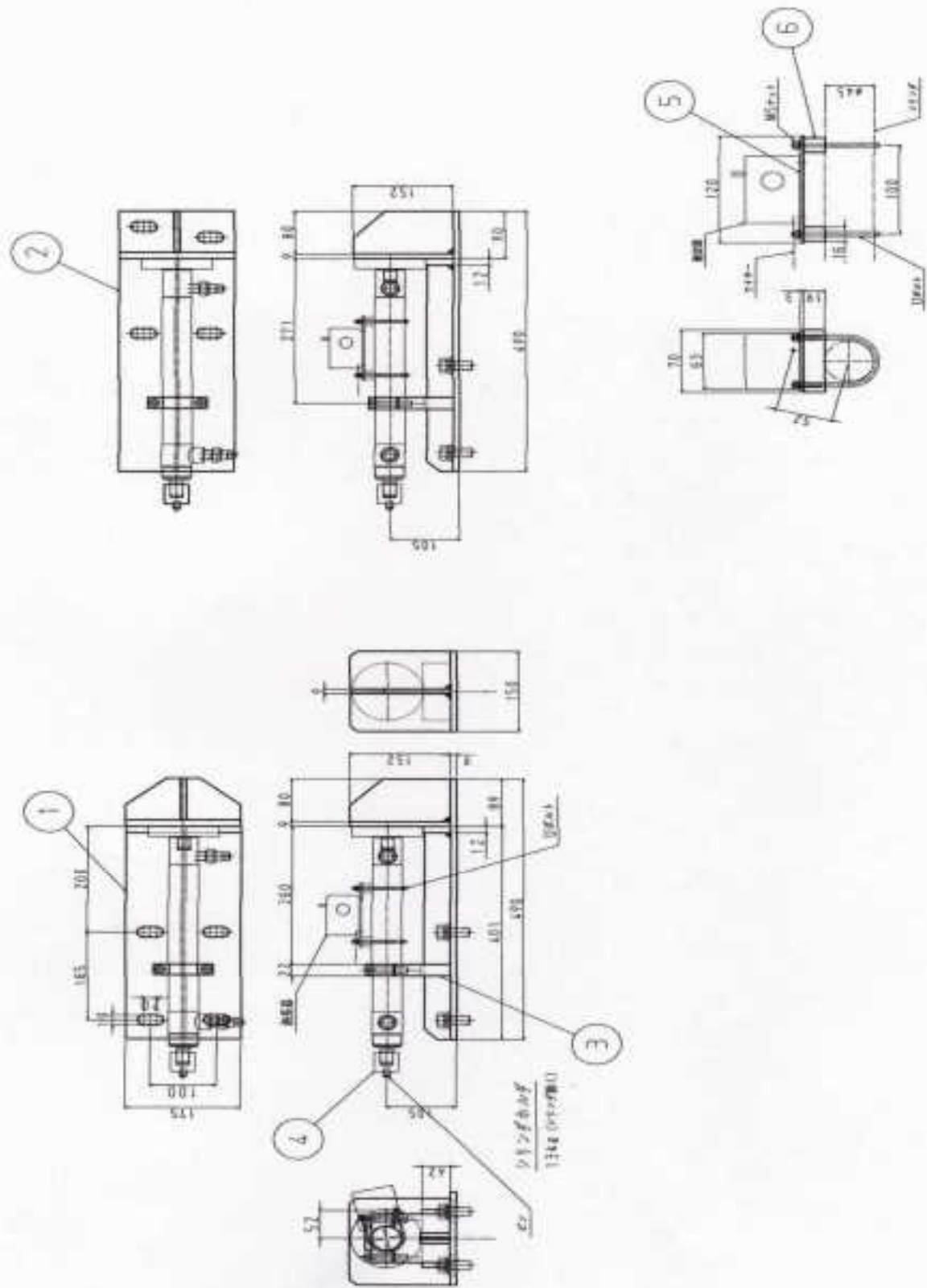


図 3-2-7 X=Y シリンドホルダ一部

3.3 実験方法

水平加力実験では、免震床を水平方向に加力し、加力点の荷重及び免震床変位等を計測し、復元機構の復元力特性の性能確認を行う。

加力操作は、作業員がモニターしているシリンダヘッドの変位を見ながら手動で行う。載荷は油圧ポンプに加圧し、除荷は油圧ポンプの圧力を解除することにより行う。

実験は、免震床に最大 150mm の変位をさせるものとし、加力はシリンダヘッドの変位で行っているため、シリンダヘッドの変位で 155mm を目安とし実験を行った。

免震床の荷重変位関係の作成は、ロードセルによる荷重と加力方向に設置した免震床変位計測用の変位計変位を用いる。

各方向への加力は基本的に 3 回づつ行った。

3.3.1 加力方向

(1) 1 方向加力

1 方向加力の加力方向のイメージ図を図 3-3-1(a) に示す。

加力方向は、基準軸とする X 方向(短辺方向)、Y 方向(長辺方向)、対角方向、45 度方向で、それぞれ正(+)負方向と負(-)方向について実施する。

加力パターンは表 3-3-1、図 3-3-2 に示す。加力パターン A は 1 回の繰り返し、加力パターン B、C は加力途中での除荷と載荷を繰り返している。

(2) 2 方向同時加力

2 方向同時加力の加力方向のイメージ図を図 3-3-1(b) に示す。2 方向同時加力実験は、加力点に設置するローラー(ガイドレール)の関係で、X(+)方向、Y(+)方向への同時加力とする。

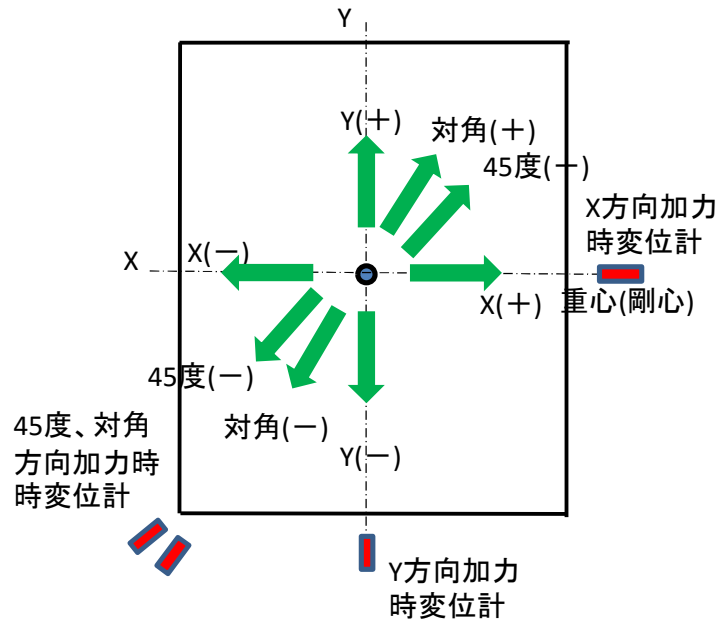
加力パターンは表 3-3-2、図 3-3-3 に示す。X 方向変位と Y 方向変位との比率で、以下の 4 パターン実施する。また、繰り返しは 1 回の載荷と除荷のパターンのみ実施する

加力パターン①：変位比は X:Y=1:1 とし、免震床は 45 度方向に変位

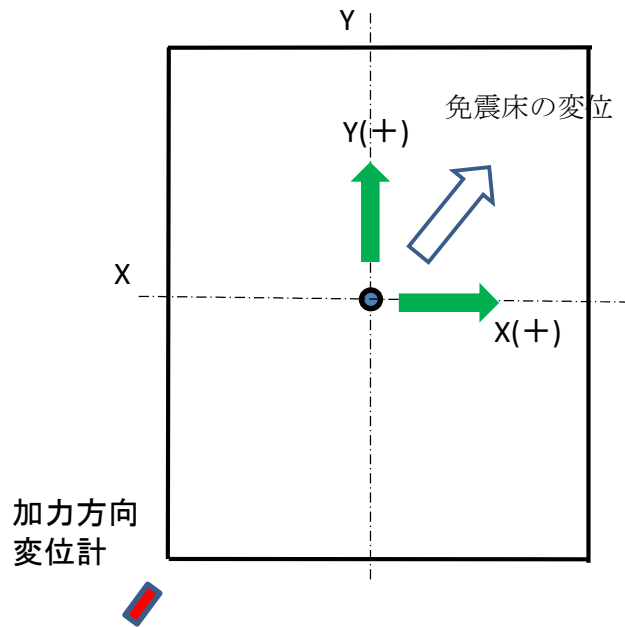
加力パターン②：変位比は X:Y=0.71:1 とし、免震床は対角方向に変位

加力パターン③：変位比は X:Y=2:1

加力パターン④：変位比は X:Y=1:2



(a) 1方向加力時の加力方向

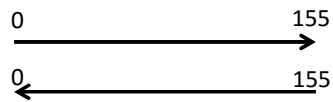


(b) 2方向加力時の加力方向

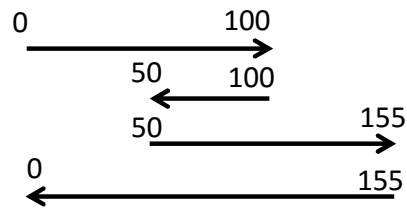
図 3-3-1 加力方向のイメージ

表 3-3-1 1 方向の加力方向と加力パターン

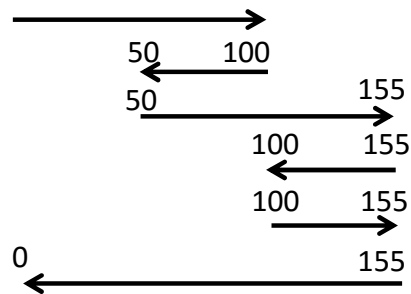
	加力パターン		
	A	B	C
X(+)方向	○	○	○
X(-)方向	○	○	○
Y(+)方向	○	—	—
Y(-)方向	○	—	—
45度(+)方向	○	—	—
45度(-)方向	○	—	—
対角(+)方向	○	—	—
対角(-)方向	○	—	—



加力パターン A



加力パターン B

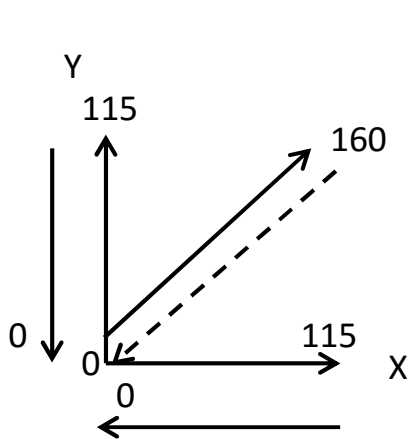


加力パターン C

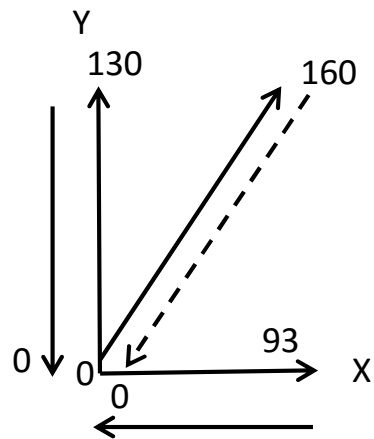
図 3-3-2 1 方向加力の加力パターン

表 3-3-2 2方向同時加力の加力パターン

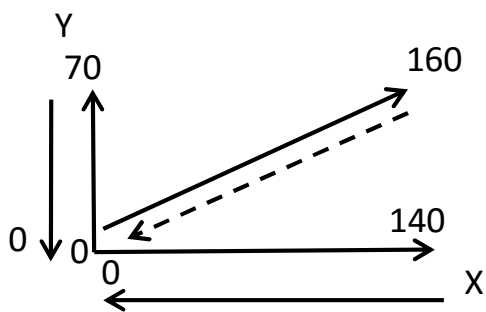
2方向	変位の比率		免震床の変位 方向
	X方向	Y方向	
パターン①	1	1	45度(+)方向
パターン②	0.71	1	対角(+)方向
パターン③	2	1	
パターン④	1	2	



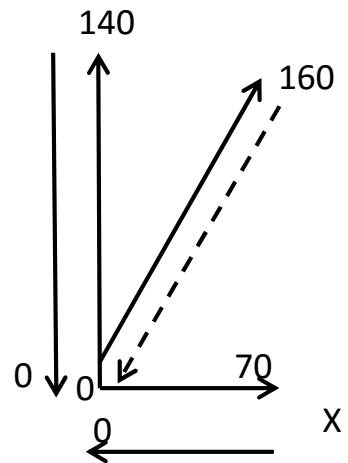
(a) 加力パターン①(45度方向, X:Y=1:1)



(b) 加力パターン②(対角方向, X:Y=0.71:1)



(c) 加力パターン③(X:Y=2:1)



(d) 加力パターン④(X:Y=1:2)

図 3-3-3 2方向同時加力の加力パターン

3.4 予備加力実験

3.4.1 免震床の全体の変形

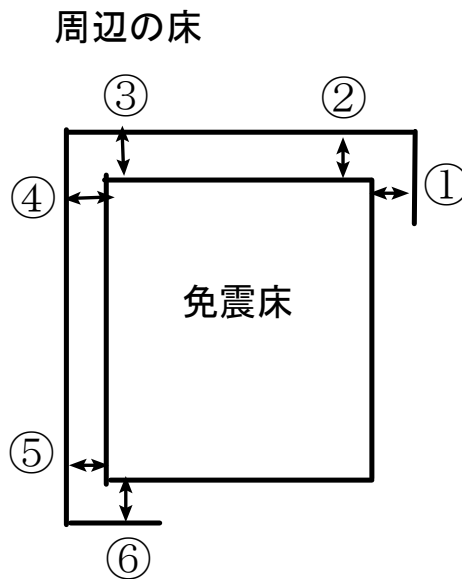
本実験は免震床の重心(剛心)を加力点とし、免震床変位を加力方向の1点のみで行っている。そこで、荷重-変形関係を計測する実験に先立って、免震床に回転変形などが起こっていないことを確認するために、免震床全体の変形を計測した。

計測方法は図3-4-1に示すように、免震床周辺に設置されているフリーアクセスフロアにより計測可能であった免震床の3つのコーナー部分(X,Y計6カ所)について、周辺床と免震床の相対変位を対象としてスケールをあて、目視で読み取ることより実施した。

加力方向は、1方向加力でX(+)方向、Y(+)方向、45度方向、対角方向について実施した。

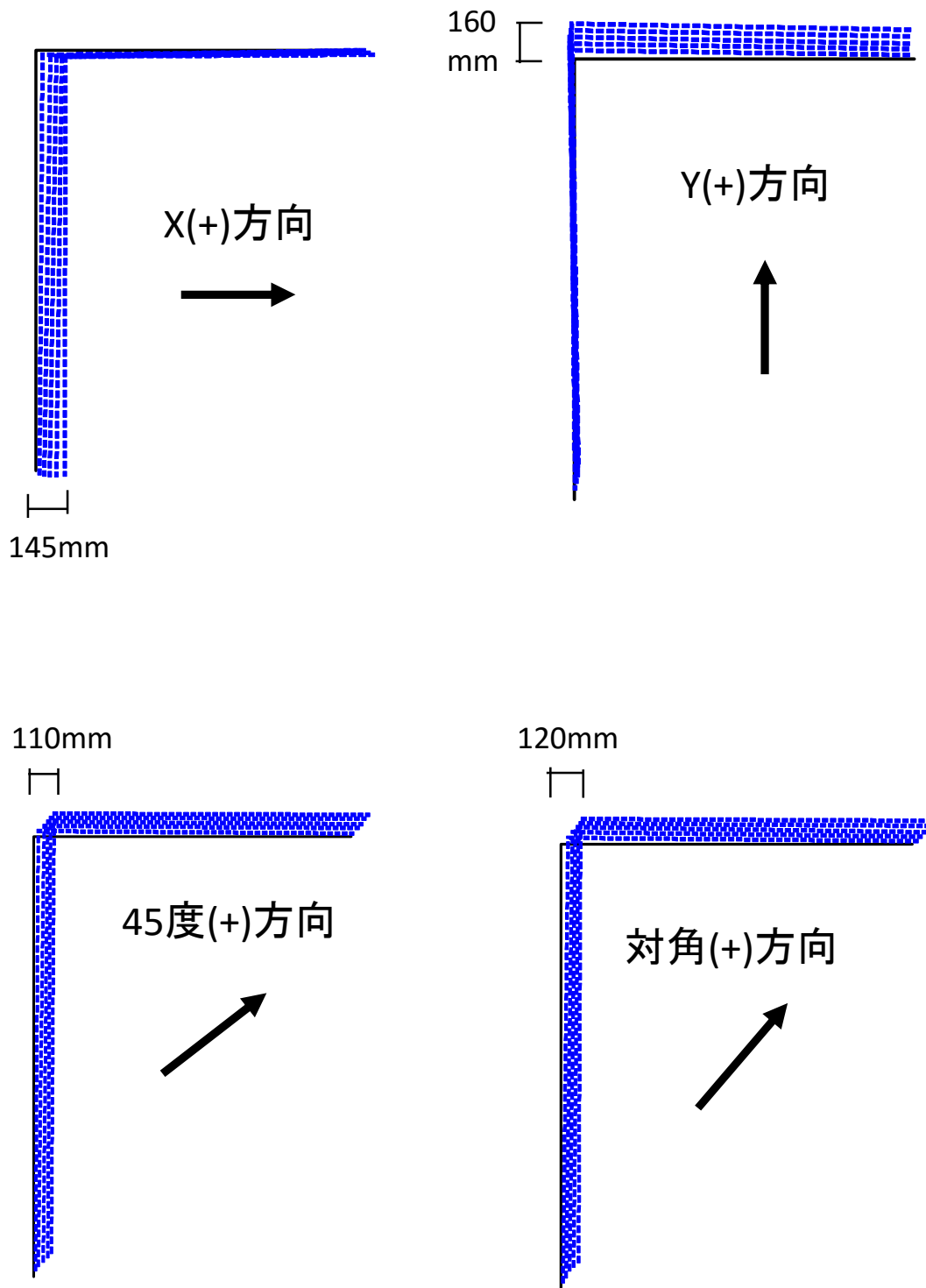
結果は図3-1に示す。シリンダヘッドの変位で、30, 60, 90, 120, 150mmのときの変位を示している。

変位が小さい範囲で、加力方向への並進変位以外の回転の影響も見られるが、変位が大きくなると、ほぼ並進的な挙動となっている。また、これは、変位振幅に依存して発生しているので、加力点が免震床と重心とずれていることの原因よりも、免震床側の機構的な原因による可能性が大きいと考えられる。



注) ①~⑥の相対変位計測を目視により行った位置を示す。

図3-4-1 免震床全体の変位の測定



注) 青破線は、加力方向のシリンダヘッドの変位で 30, 60, 90, 120, 150mm に変形をしめす。変形は実際の変位を 2 倍している。

図 3-4-2 免震床全体の変形

3.4.2 復元力機構の変形

予備実験として、復元力機構の変形を計測した。

図 3-4-3 に示すように、復元力機構の 4 つの接点において、X, Y 方向の 8 つの変位を計測した。加力方向は、1 方向加力で X(+) 方向、Y(+) 方向、45 度方向、対角方向について実施した。変位はスケールをあて、目視により計測した。

結果は図 3-4-4 に示す。シリンダヘッドの変位で、30, 60, 90, 120, 150mm のときの変位を示している。また、図 3-4-5 には例として、Y 方向加力で変位 150mm 時点の写真を示す。

特に X(+) 方向加力の場合、変位が小さい範囲で、2 本のばねが非対称に伸びる傾向がみられるが、変位が大きくなると、その傾向は小さくなっている。

45 度方向、対角方向の復元力機構のばねの変形状態から、復元力機構は原点に向かって、戻そうとする力が働いていることを見る事が出来る。

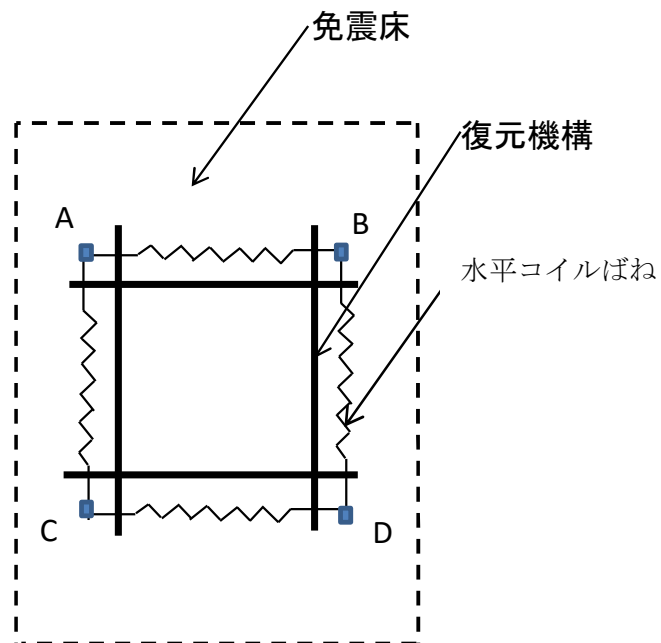
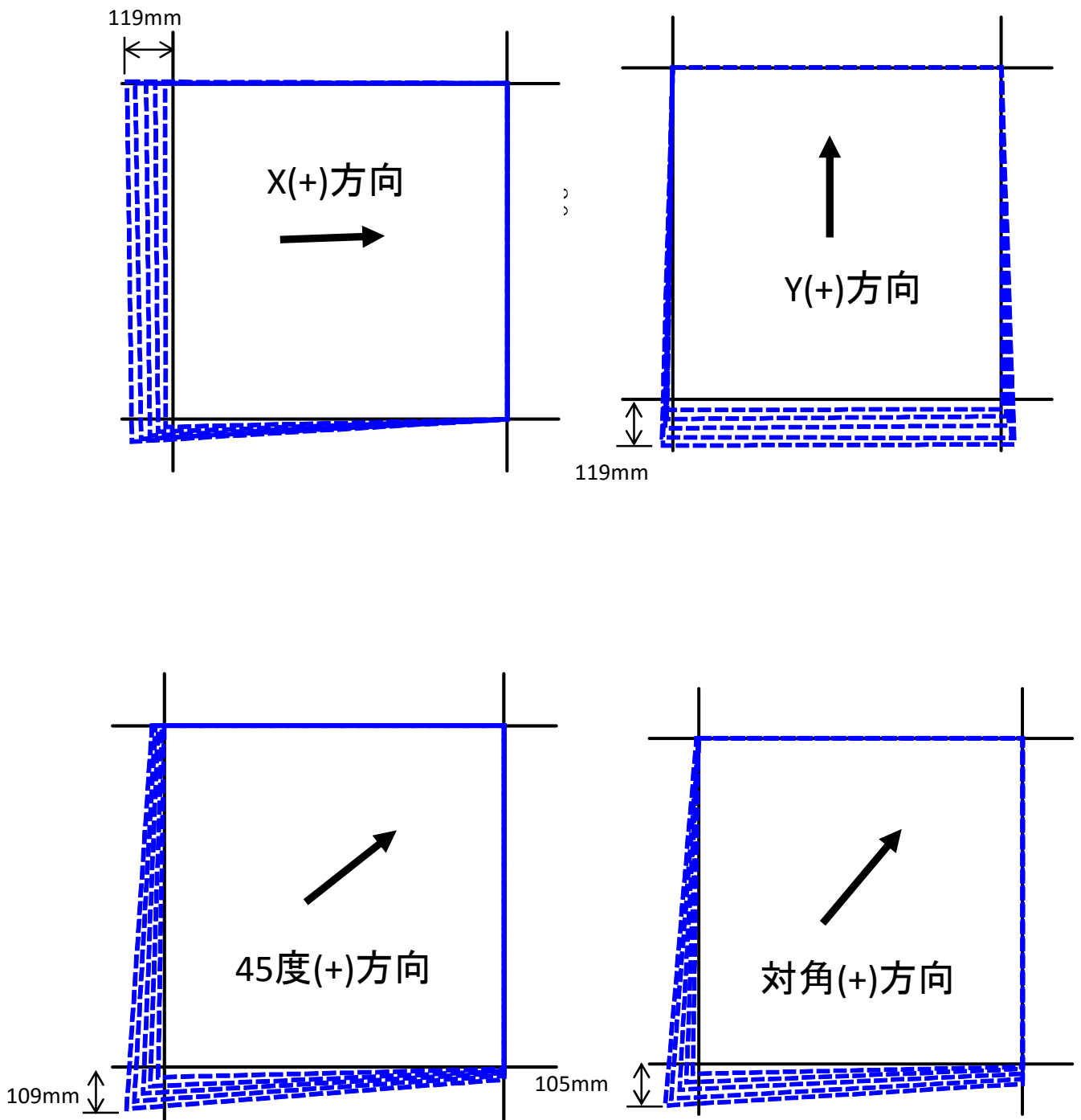


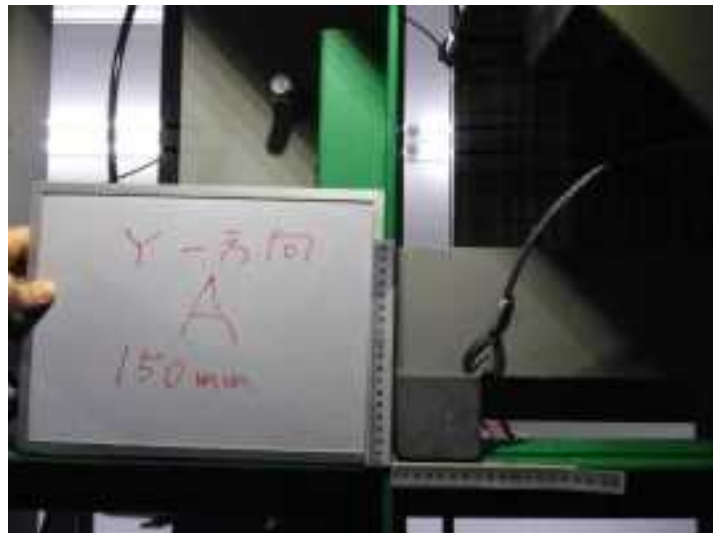
図 3-4-3 復元力機構の変形の測定位置



注) 青破線は、加力方向のシリンダヘッドの変位で 30, 60, 90, 120, 150mm での各コーナーの変形をしめす。変形は実際の変位を 2 倍している

図 3-4-4 復元力機構の変形

(a) A点



(b) C点



(c) D点



図 3-4-5 復元力機構の変形の例 (Y 方向加力, 150mm 時点)

3.4.3 加力用架台の影響

本実験の制御はシリンダヘッドの変位によって行っている。予備実験を行い、シリンダヘッドの変位と免震床の変位の相違について検討する。図 3-4-6 に示すように X(+) 方向の加力を実施する。変位計の設置状況は図 3-4-6 に示す。変位計 1 で免震床の変位、変位計 2 は加力架台上端での変位、変位計 3 は加力用のシリンダヘッドの変位を計測している。

図 3-4-7 には各変位計により記録された変位の時刻歴(横軸は時間(秒))を示す。加力はシリンダヘッドの変位で最大 155mm としている。図 3-4-7(b) よりシリンダヘッド(変位計 3)と加力架台上端部(変位計 2)との変位差は最大 5mm 程度、図 3-4-7(c) より加力架台上端部(変位計 2)と免震床との変位差(変位計 1)は最大 5mm 程度である。図 3-4-7(d) よりシリンダヘッド(変位計 3)と免震床(変位計 1)との変位差は、加力架台上端部の変位が先行する変位分布となっているので最大 3mm 程度となっている。変位計 3 と変位計 1 との最大変位差 3.4mm を免震床に想定する最大変位 150mm で除すると約 2.3%程度となっている。

本実験では、免震床に想定する最大変位 150mm とするので、1 方向加力の場合にシリンダヘッドの変位を 155mm まで加力を行うものとしている。

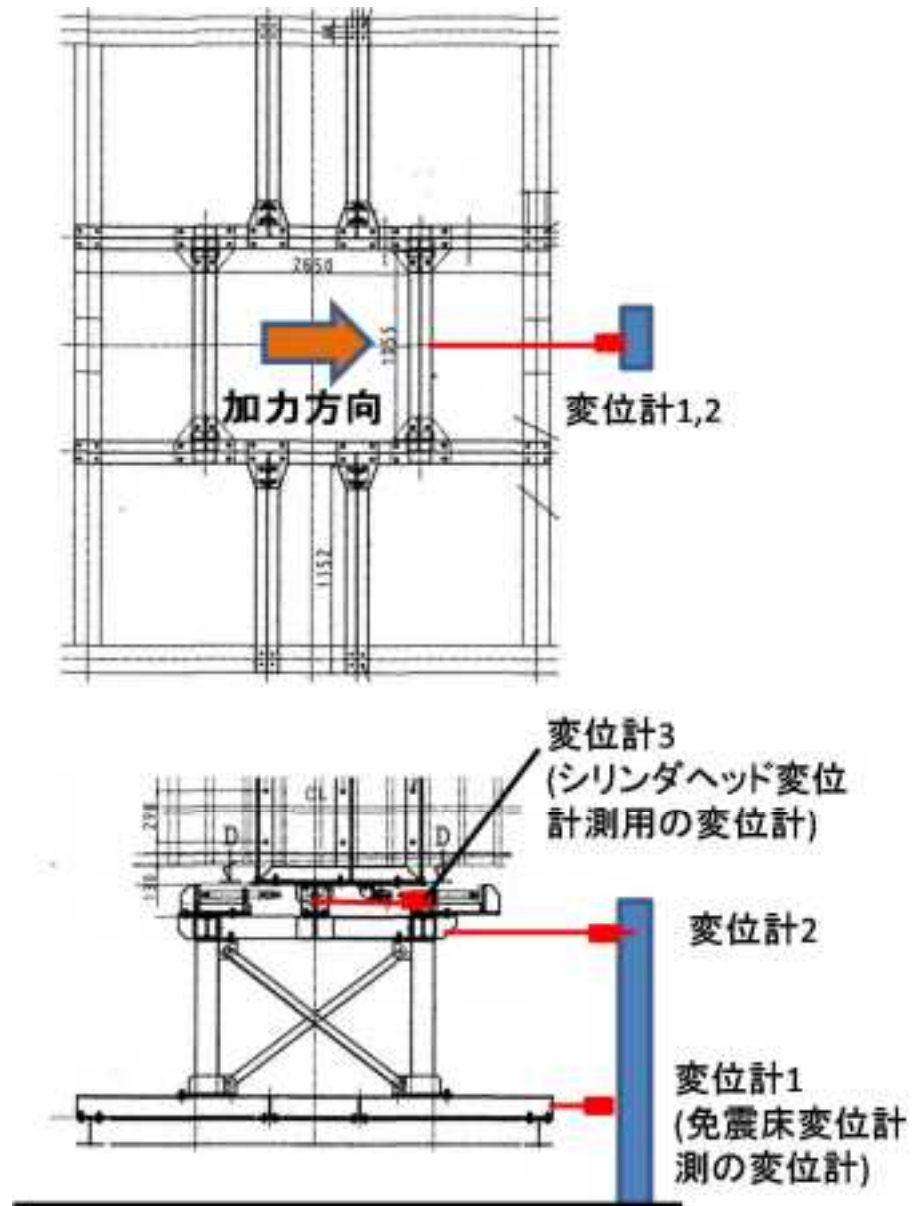
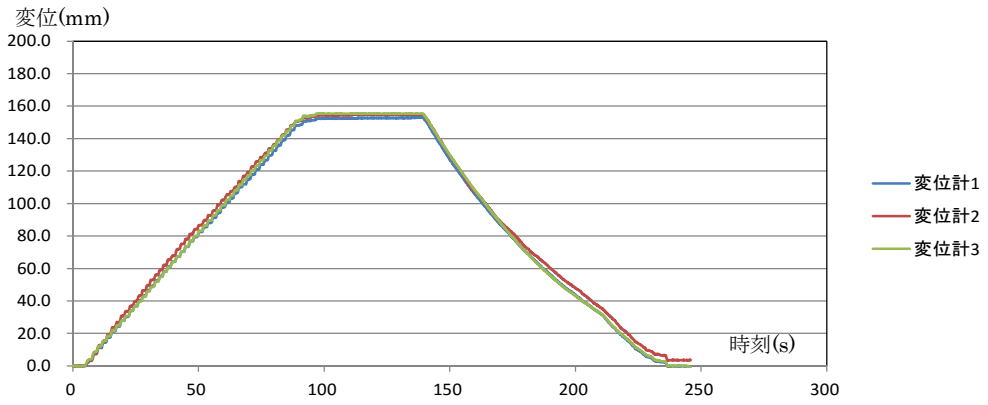
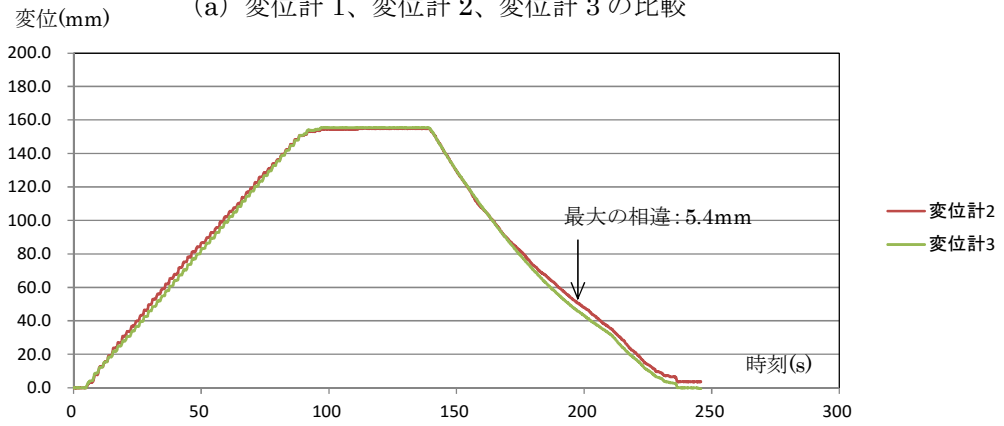


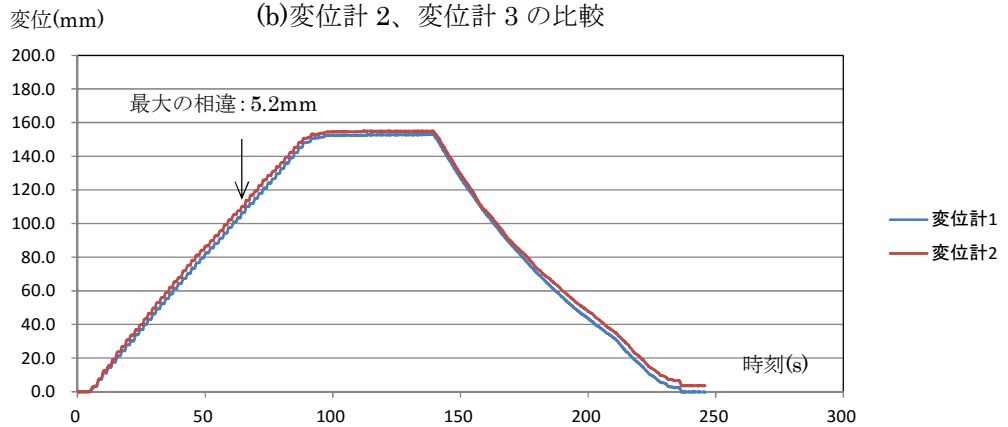
図 3-4-6 加力架台の影響を検討するための実験状況



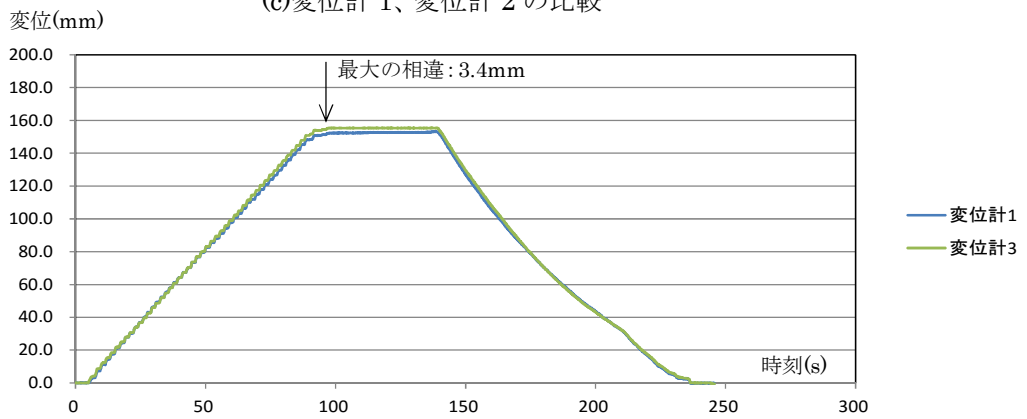
(a) 変位計 1、変位計 2、変位計 3 の比較



(b) 変位計 2、変位計 3 の比較



(c) 変位計 1、変位計 2 の比較



(d) 変位計 1、変位計 3 の比較

図 3-4-7 各変位計の変位時刻歴

3.5 荷重変位関係

3.5.1 水平方向の荷重変位関係

本免震床の荷重変位関係は、以下のように、予引張力、ばね定数、摩擦力によって表現される。実験から得られた荷重変位関係から、上記の 3 つのパラメータに摩擦係数(=摩擦力/免震床重量(50kN))を加えて、4 つのパラメータを評価する。

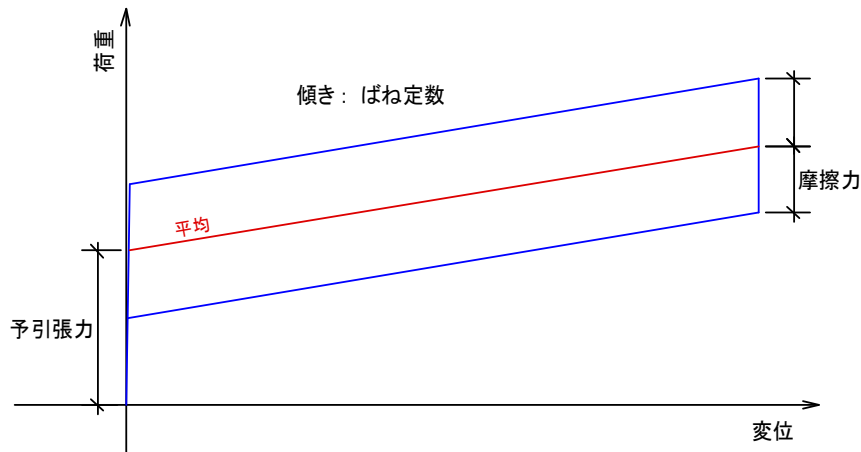


図 3-5-1 荷重変位関係の 3 つのパラメータ

3.5.2 1 方向加力 (加力パターン A)

以下に掲載した表、図の一覧を示す。

表 3-5-1 1 方向加力 (加力パターン A) X 方向、Y 方向のまとめ

表 3-5-2 設計時の各パラメータの許容範囲

表 3-5-3 1 方向加力 (加力パターン A), 45 度方向のまとめ

表 3-5-4 1 方向加力 (加力パターン A), 対角方向のまとめ

図 3-5-2 1 方向加力, X(+) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-3 1 方向加力, X(-) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-4 1 方向加力, Y(+) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-5 1 方向加力, Y(-) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-6 1 方向加力, 45 度 (+) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-7 1 方向加力, 45 度 (-) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-8 1 方向加力, 対角 (+) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-9 1 方向加力, 対角 (-) 方向 (加力パターン A) の実験結果

図 3-5-2～図 3-5-9 に各方向(加力パターン A)の 3 回の実験による荷重-変位関係を示す。図中には 3 つのパラメータを評価し近似した直線も示す。下段の表は各実験結果のパラメータの値も示している。

(1) X、Y 方向加力実験

図 3-5-2、図 3-5-3 の X 正(+)方向と X 負(-)方向を比較すると、予引張力で(+)方向が小さい目であるが、他のパラメータは同程度である。図 3-5-4、図 3-5-5 の Y 正(+)方向と Y 負(-)方向を比較すると、X 方向と同様に予引張力で(+)方向が小さい目であるが、他のパラメータは同程度である。

X 方向と Y 方向の結果を比較(表 3-5-1)すると、各パラメータは大きくなっており、その影響は、実験結果の荷重変位関係からも直接見ることが出来る。

また、設計時に設定されている各パラメータの許容範囲は表 3-5-2 に示している。表 3-5-1(c) に示した X、Y 方向全体としての平均値と比較すると、各パラメータは許容範囲内となっている。

(2) 45 度方向、対角方向

図 3-5-6、図 3-5-7 の 45 度正(+)方向と負(-)方向を比較すると、予引張力で(+)方向が小さいが、ばね定数と摩擦係数は程度ではより大きくなる傾向が見られる。予引張力が、X、Y 方向の場合と比較して低く、載加時の比較的変位が小さい範囲の荷重変位関係が放物線的になるのは、復元力機構のばねの方向性の影響と考えられる。

図 3-5-8、図 3-5-9 の対角正(+)方向と負(-)方向を比較すると、45 度方向と同様に、予引張力で(+)方向が小さいが、ばね定数と摩擦係数は程度ではより大きくなる傾向が見られる。

(3) 1 方向加力のまとめ

表 3-5-1、表 3-5-3、表 3-5-4 に示した X、Y 方向、45 度方向、対角方向にたいする各方向全体の平均を比べると、評価された各パラメータには大きな相違はなく、ほぼ方向に依存しない荷重変位関係であることがわかる。また、45 度方向(表 3-5-3)については、昨年度の結果を参考として示したが、各パラメータにおいてほぼ同程度の値が得られていることがわかる。

表 3-5-1 1 方向加力(加力パターン A) X 方向、Y 方向のまとめ

(a)X 方向加力

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
X(+) ^の 平均	0.646	0.0070	0.692	0.0071
X(-) ^の 平均	0.821	0.0061	0.650	0.0066
X方向の平均	0.733	0.0065	0.671	0.0068

(b)Y 方向加力

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
Y(+) ^の 平均	0.817	0.0083	0.800	0.0082
Y(-) ^の 平均	0.992	0.0087	0.783	0.0080
Y方向の平均	0.904	0.0085	0.792	0.0081

(c)X、Y 方向加力

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
X方向の平均	0.733	0.0065	0.671	0.0068
Y方向の平均	0.904	0.0085	0.792	0.0081
全平均	0.819	0.0075	0.731	0.0075

表 3-5-2 設計時の各パラメータの許容範囲

方向	項目	設計値	設計許容値	実測値
45°方向	総ばね定数 [kN/mm]	0.0079	0.0063 ~ 0.0095	0.0067
	予引張力 [kN]	0.9996	0.7997 ~ 1.1956	0.8407
	摩擦係数 [μ]	0.01	0.0075 ~ 0.0125	0.0105
	残留変位 [mm]	0	-5 ~ 5	1.75

表 3-5-3 1 方向加力 (加力パターン A), 45 度方向のまとめ

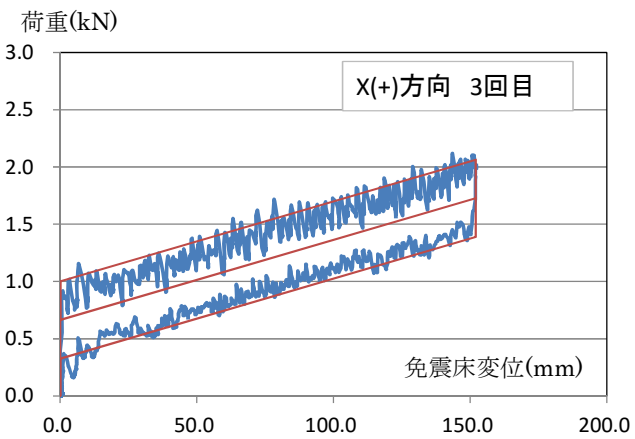
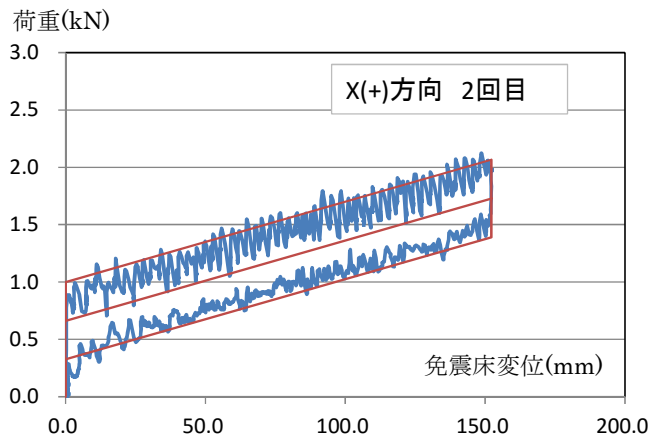
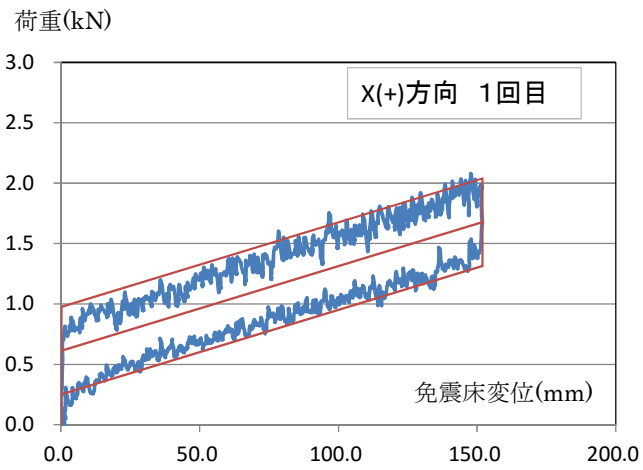
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
45度(+)の平均	0.654	0.0083	0.792	0.0081
45度(-)の平均	0.921	0.0069	0.725	0.0074
45度の平均	0.788	0.0076	0.758	0.0077

参考 昨年度の実験結果

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
45度方向	0.850	0.0081	0.775	0.0079

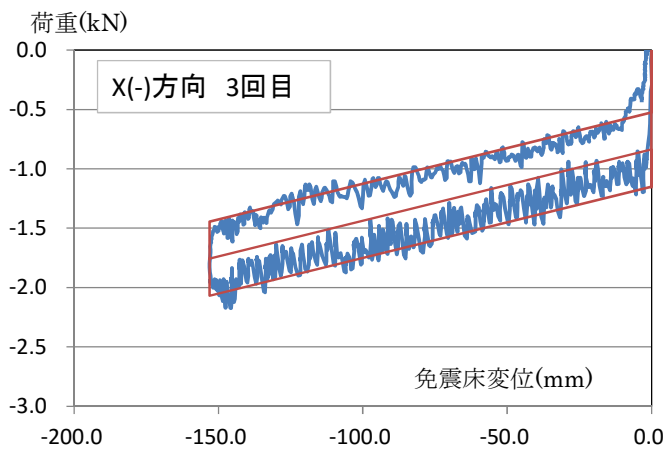
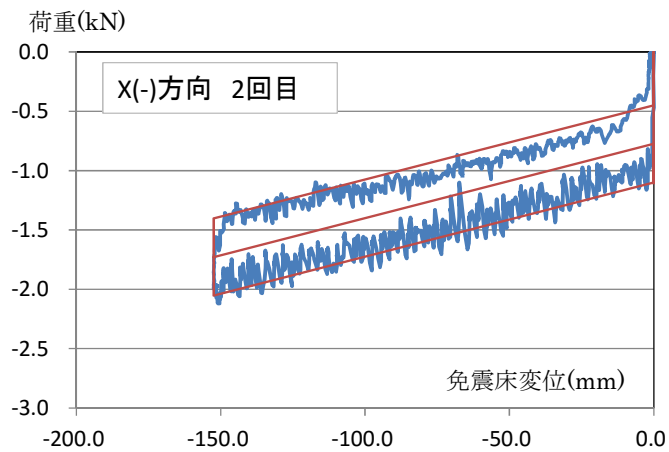
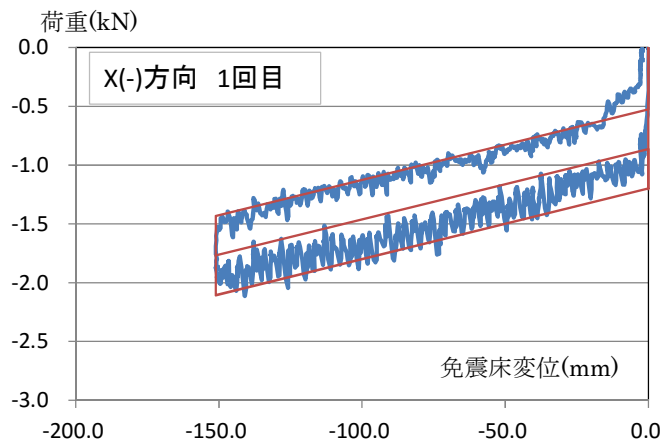
表 3-5-4 1 方向加力 (加力パターン A), 対角方向のまとめ

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力 (kN)	摩擦係数
対角(+)の平均	0.692	0.0081	0.800	0.0082
対角(-)の平均	0.892	0.0078	0.700	0.0071
対角の平均	0.792	0.0080	0.750	0.0077



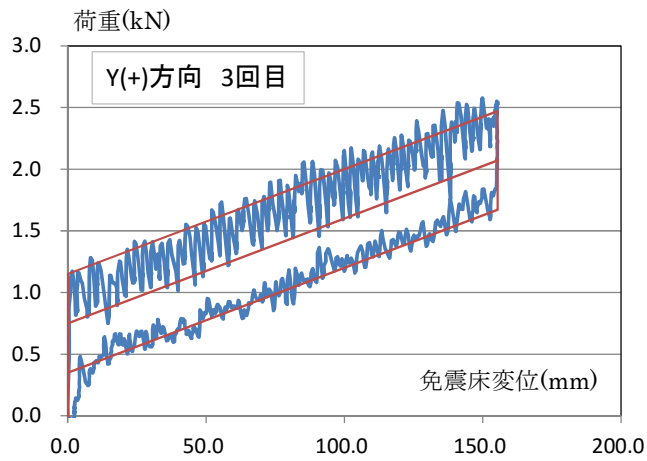
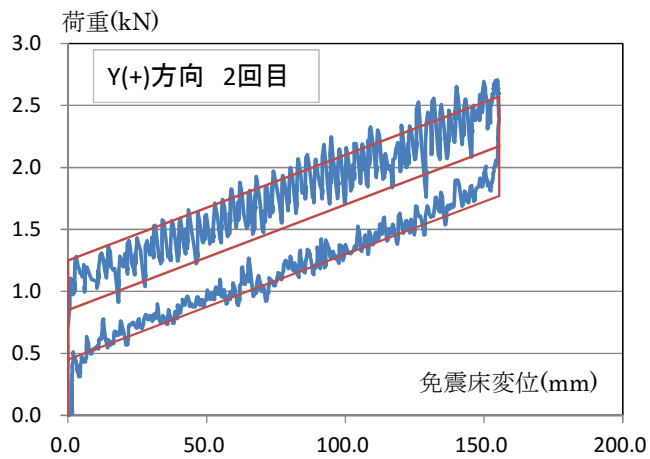
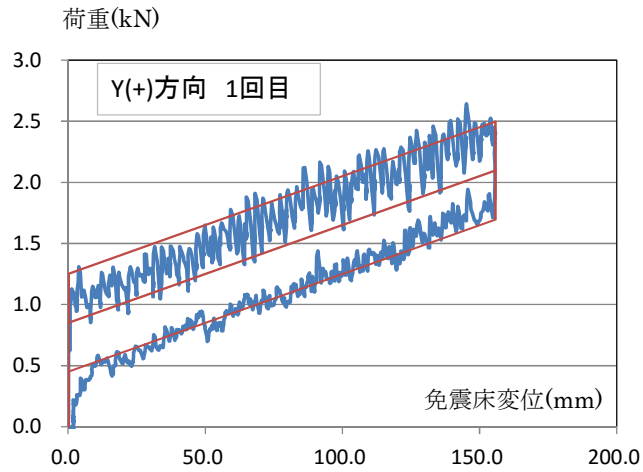
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
X(+)-1	0.613	0.0070	0.725	0.0074
X(+)-2	0.663	0.0070	0.675	0.0069
X(+)-3	0.663	0.0070	0.675	0.0069
X(+) ^の 平均	0.646	0.0070	0.692	0.0071

図 3-5-2 1 方向加力, X(+) 方向 (加力パターン A) の実験結果



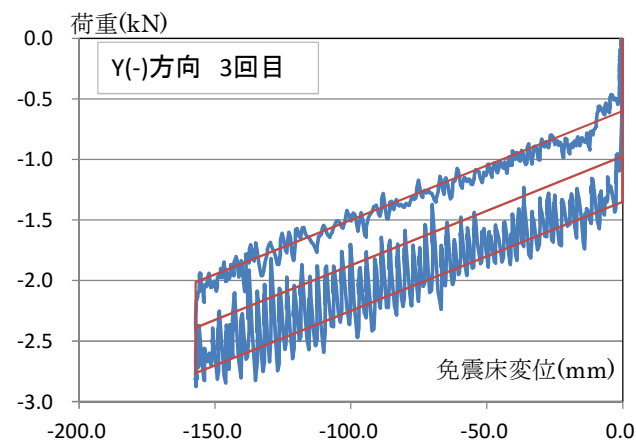
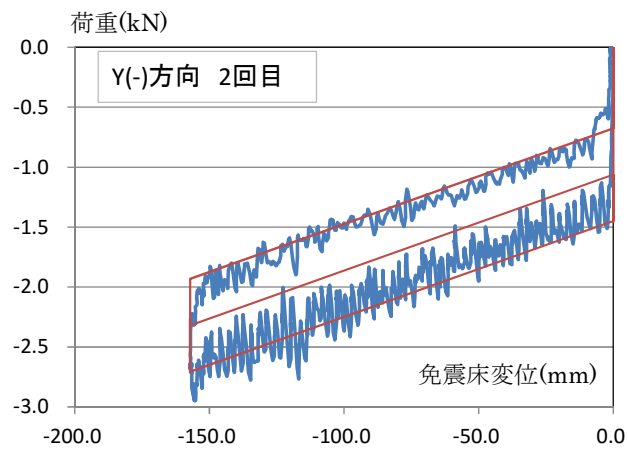
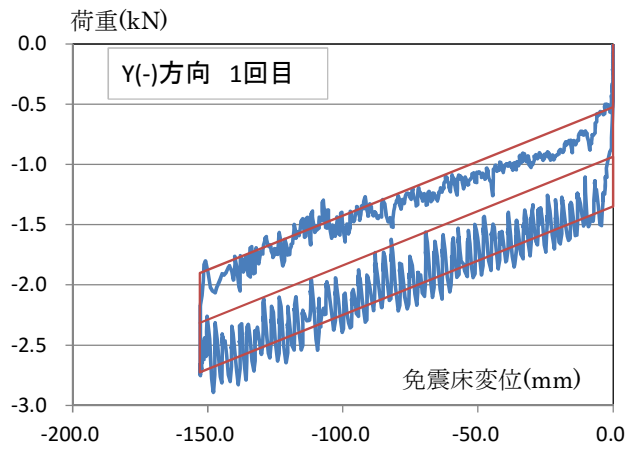
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
X(-)-1	0.863	0.0060	0.675	0.0069
X(-)-2	0.763	0.0063	0.650	0.0066
X(-)-3	0.838	0.0060	0.625	0.0064
Y(+) の平均	0.821	0.0061	0.650	0.0066

図 3-5-3 1 方向加力, X(-) 方向 (加力パターン A) の実験結果



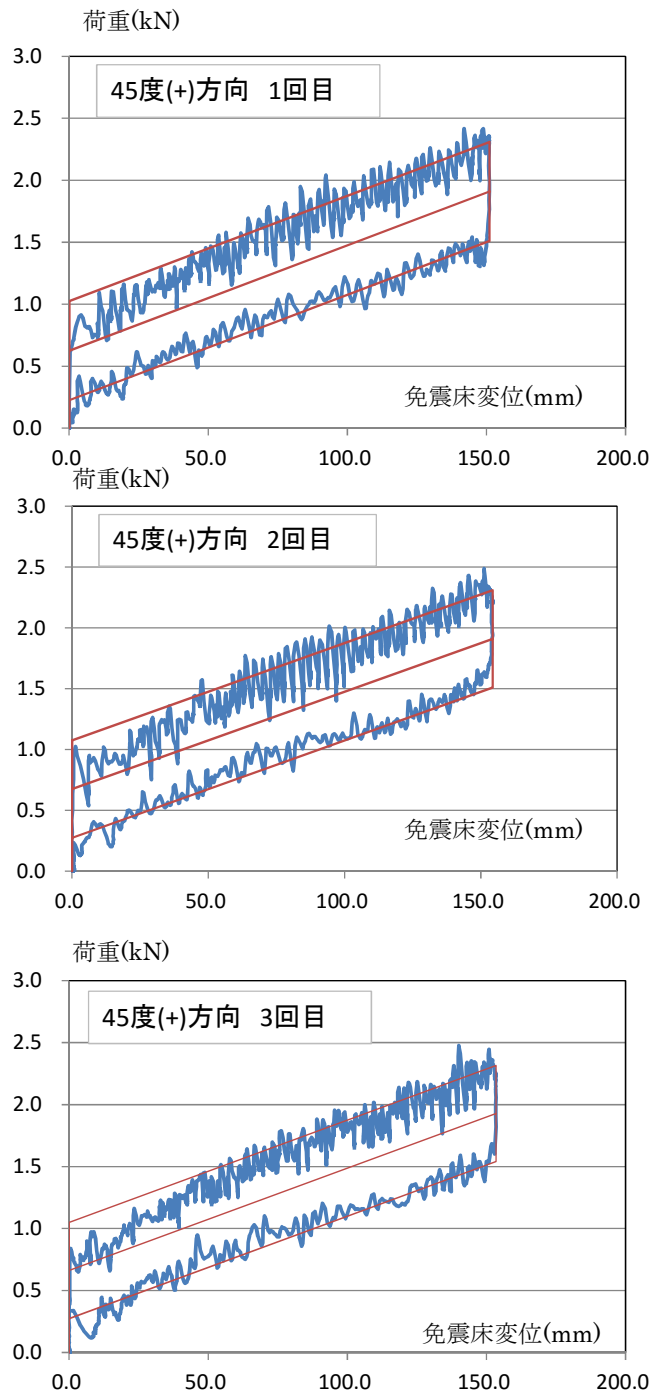
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
Y(+)-1	0.850	0.0080	0.800	0.0082
Y(+)-2	0.850	0.0085	0.800	0.0082
Y(+)-3	0.750	0.0085	0.800	0.0082
Y(+) の平均	0.817	0.0083	0.800	0.0082

図 3-5-4 1 方向加力, Y(+) 方向 (加力パターン A) の実験結果



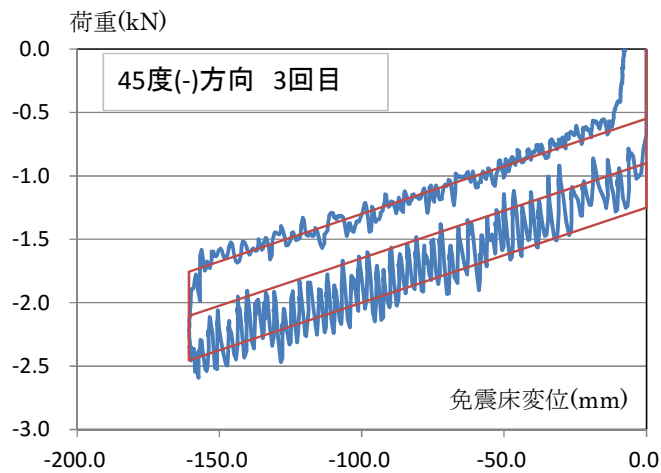
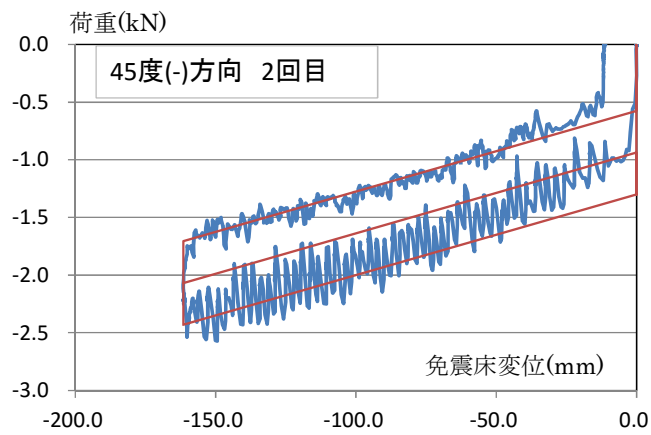
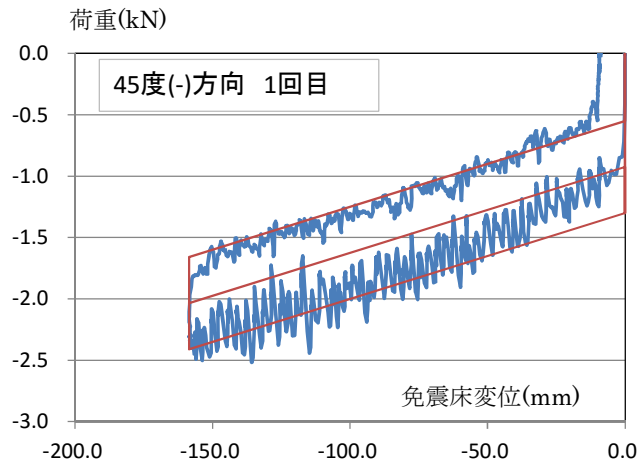
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
Y(-)-1	0.938	0.0090	0.825	0.0084
Y(-)-2	1.063	0.0080	0.775	0.0079
Y(-)-3	0.975	0.0090	0.750	0.0077
Y(-)の平均	0.992	0.0087	0.783	0.0080

図 3-5-5 1 方向加力, Y(-) 方向 (加力パターン A) の実験結果



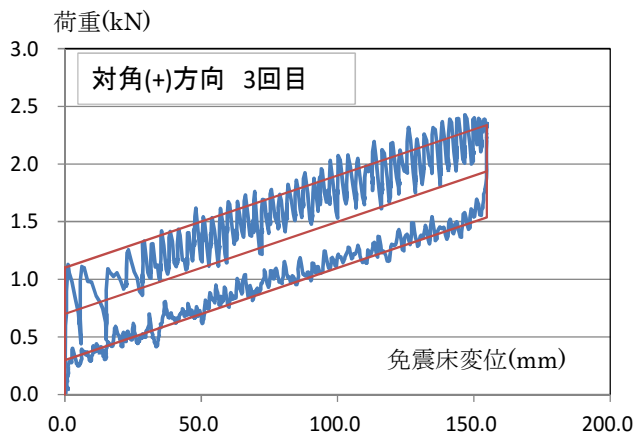
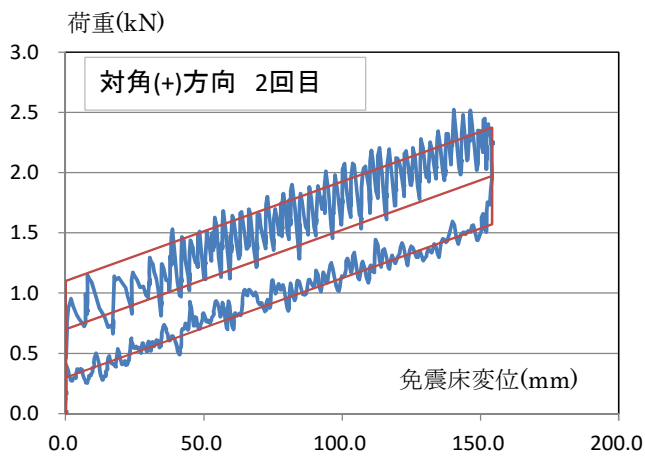
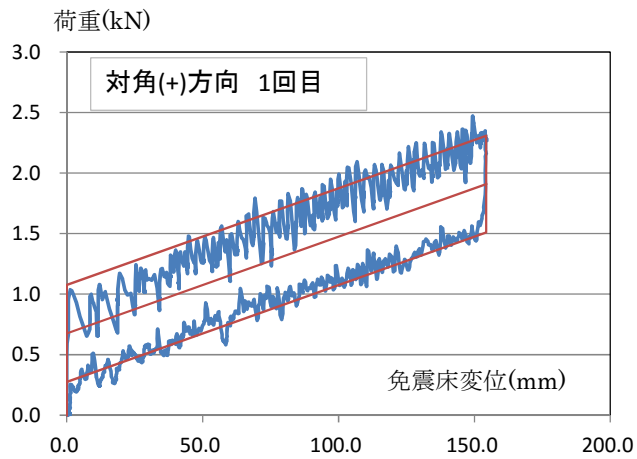
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
45度(+)-1	0.625	0.0085	0.800	0.0082
45度(+)-2	0.675	0.0080	0.800	0.0082
45度(+)-3	0.663	0.0083	0.775	0.0079
45度(+) の平均	0.654	0.0083	0.792	0.0081

図 3-5-6 1 方向加力, 45 度(+) 方向(加力パターン A) の実験結果



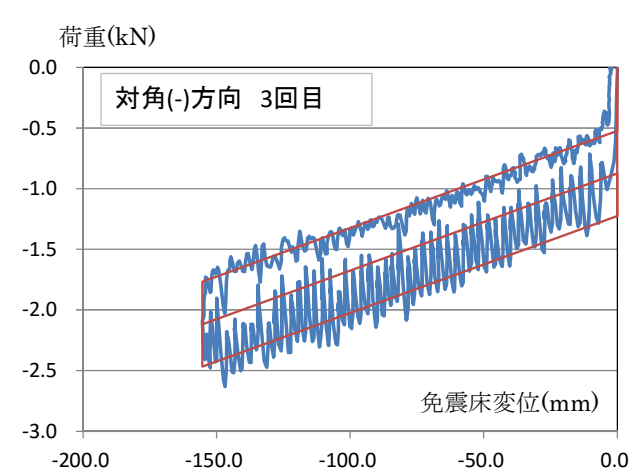
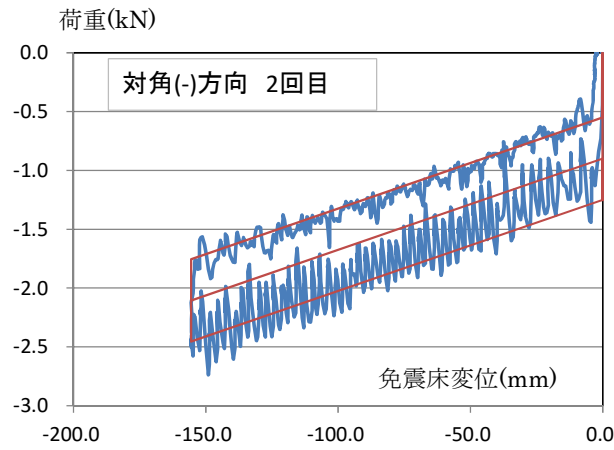
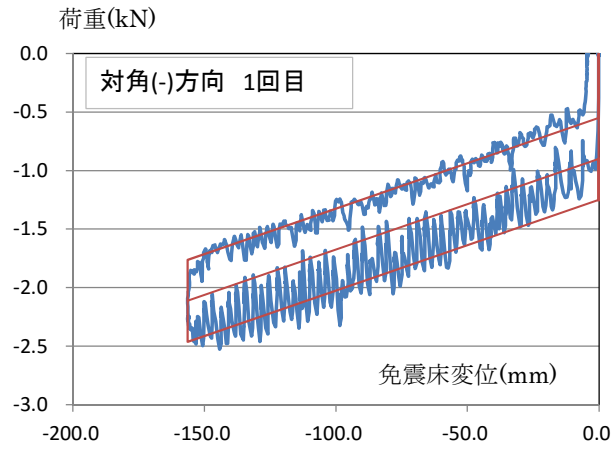
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
45度(-)-1	0.925	0.0070	0.750	0.0077
45度(-)-2	0.938	0.0070	0.725	0.0074
45度(-)-3	0.900	0.0068	0.700	0.0071
45度(-)の平均	0.921	0.0069	0.725	0.0074

図 3-5-7 1 方向加力, 45 度 (-) 方向 (加力パターン A) の実験結果



	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力 (kN)	摩擦係数
対角(+)-1	0.675	0.0080	0.800	0.0082
対角(+)-2	0.700	0.0083	0.800	0.0082
対角(+)-3	0.700	0.0080	0.800	0.0082
対角(+) の平均	0.692	0.0081	0.800	0.0082

図 3-5-8 1 方向加力, 対角 (+) 方向 (加力パターン A) の実験結果



	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力 (kN)	摩擦係数
対角(-)-1	0.900	0.0078	0.700	0.0071
対角(-)-2	0.900	0.0078	0.700	0.0071
対角(-)-3	0.875	0.0080	0.700	0.0071
対角(-)の平均	0.892	0.0078	0.700	0.0071

図 3-5-9 1 方向加力, 対角(-)方向(加力パターン A)の実験結果

3.5.3 1方向加力(加力パターンB,加力パターンC)

以下に掲載する表、図の一覧を示す。

表 3-5-5 1方向加力, X(+)方向加力パターンB, Cによる各パラメータの値

表 3-5-6 1方向加力, Y(+)方向加力パターンB, Cによる各パラメータの値

図 3-5-10 1方向加力, X(+)方向(加力パターンB)の例(3回目)

図 3-5-11 1方向加力, X(+)方向(加力パターンB)による荷重変位関係

図 3-5-12 1方向加力, X(+)方向(加力パターンC)の例(3回目)

図 3-5-13 1方向加力, X(+)方向(加力パターンC)による荷重変位関係

図 3-5-14 1方向加力, Y(+)方向(加力パターンB)の例(3回目)

図 3-5-15 1方向加力, Y(+)方向(加力パターンB)による荷重変位関係

図 3-5-16 1方向加力, Y(+)方向(加力パターンC)の例(3回目)

図 3-5-17 1方向加力, Y(+)方向(加力パターンC)による荷重変位関係

(1) X(+)方向

図 3-5-10～図 3-5-13 に X(+)方向の加力パターンB, Cによる実験結果の荷重-変位関係を示す。加力パターンに載加、除荷の細かい繰り返しが入っていても、ほぼ安定したループ上に乗っていることが分かる。各図中には近似直線を作成して評価した予引張力、ばね定数、摩擦係数(摩擦力)も示している。加力パターンB, Cによる各パラメータの値には大きな層はなく、ほぼ同一のループ形状を示していることがわかる。表 3-5-5 には、X(+)方向の加力パターンB, Cによる全結果の各パラメータの平均を示しているが、表 3-5-1 に示した加力パターンAの結果と大きな相違は見られない。

(2) Y(+)方向

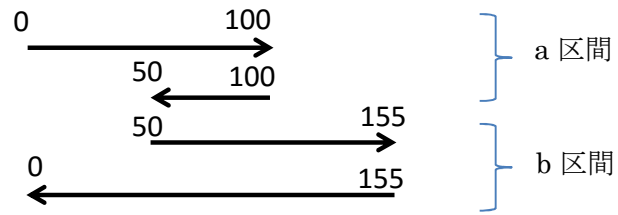
図 3-5-14～図 3-5-17 に Y(+)方向の加力パターンB, Cによる実験結果の荷重-変位関係を示す。X(+)方向と同様に加力パターンに載加、除荷の細かい繰り返しが入っていても、ほぼ安定したループ上に乗っていることが分かる。加力パターンB, Cによる予引張力、ばね定数、摩擦係数(摩擦力)の値には大きな相違はなく、ほぼ同ループ形状を示していることがわかる。表 3-5-6 には、Y(+)方向の加力パターンB, Cによる全結果の各パラメータの平均を示しているが、X(+)方向と同様に表 3-5-1 に示した加力パターンAの結果と大きな相違は見られない。

表 3-5-5 1 方向加力, X(+) 方向加力パターン B, C による各パラメータの値

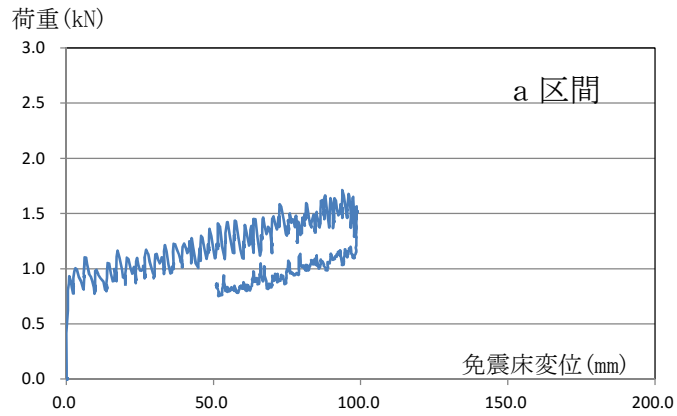
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
X(+) 加力パターンB平均	0.646	0.0069	0.608	0.0062
X(+) 加力パターンC平均	0.633	0.0072	0.600	0.0061
X(+) 加力パターンB,Cの平均	0.640	0.0070	0.604	0.0062

表 3-5-6 1 方向加力, Y(+) 方向加力パターン B, C による各パラメータの値

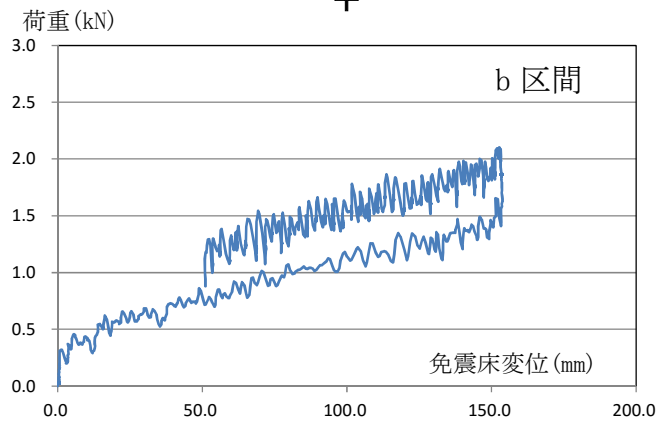
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
Y(+) 加力パターンB平均	0.733	0.0094	0.767	0.0078
Y(+) 加力パターンC平均	0.725	0.0100	0.783	0.0080
Y(+) 加力パターンB,Cの平均	0.729	0.0097	0.775	0.0079



加力パターン B(シリンダヘッドの変位(mm))



+



||

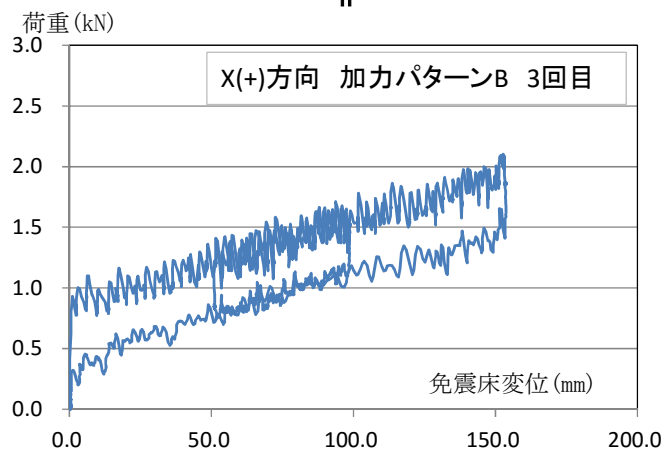
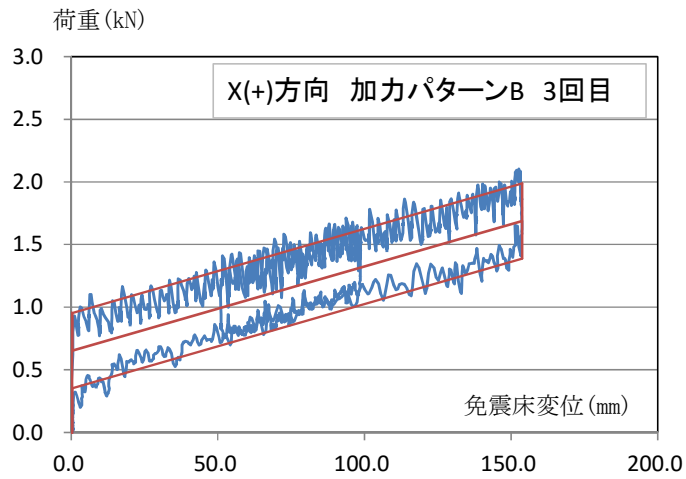
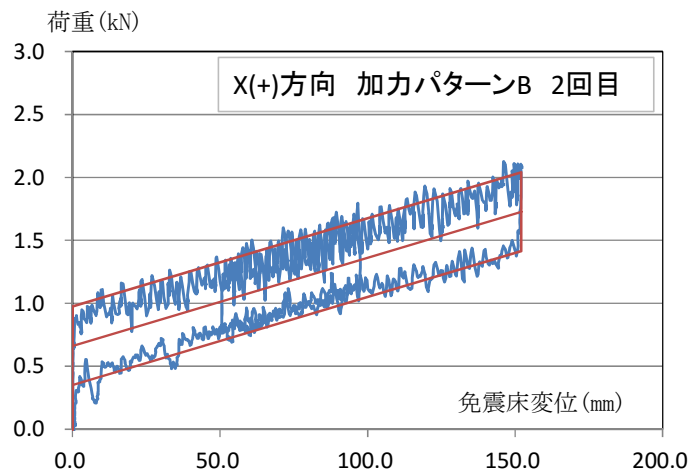
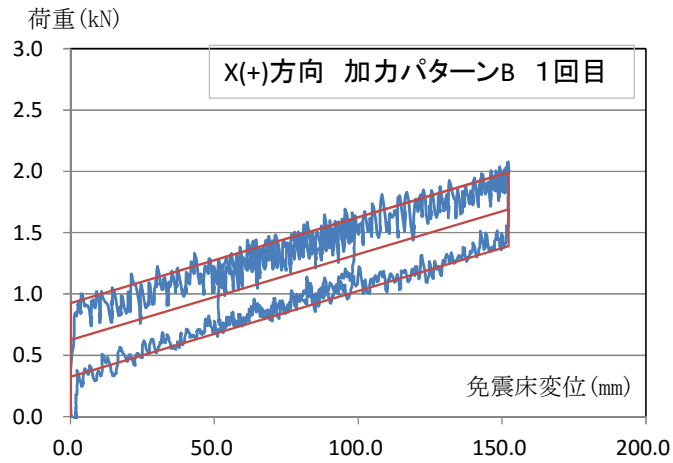
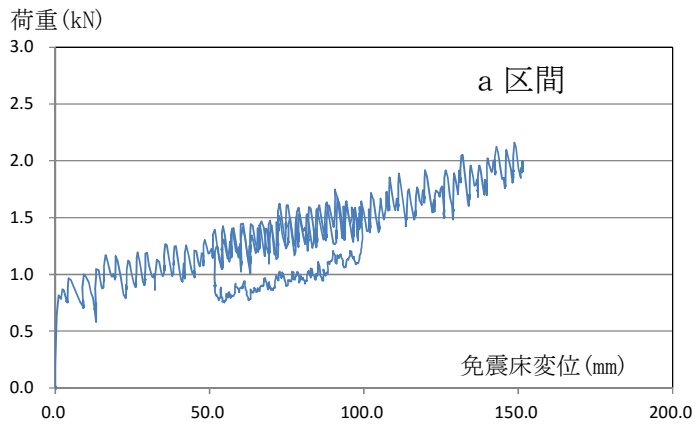
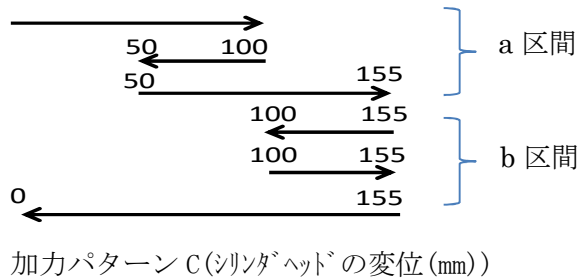


図 3-5-10 1 方向加力, X(+) 方向(加力パターン B) の例(3 回目)

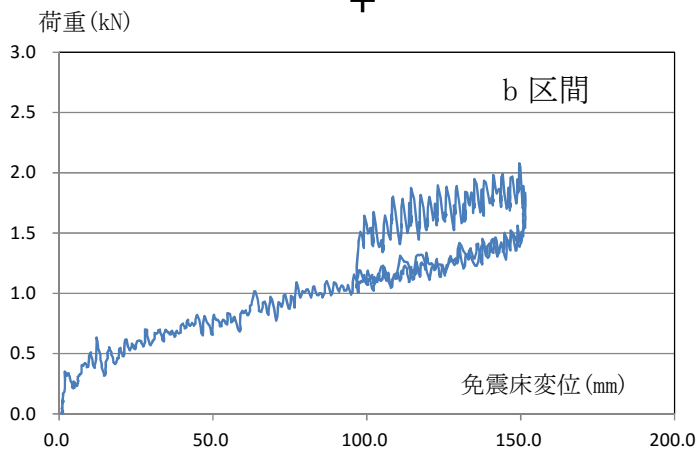


	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
X(+)-B-1	0.625	0.0070	0.600	0.0061
X(+)-B-2	0.663	0.0070	0.625	0.0064
X(+)-B-3	0.650	0.0068	0.600	0.0061
平均	0.646	0.0069	0.608	0.0062

図 3-5-11 1 方向加力, X(+) 方向(加力パターン B)による荷重変位関係



+



II

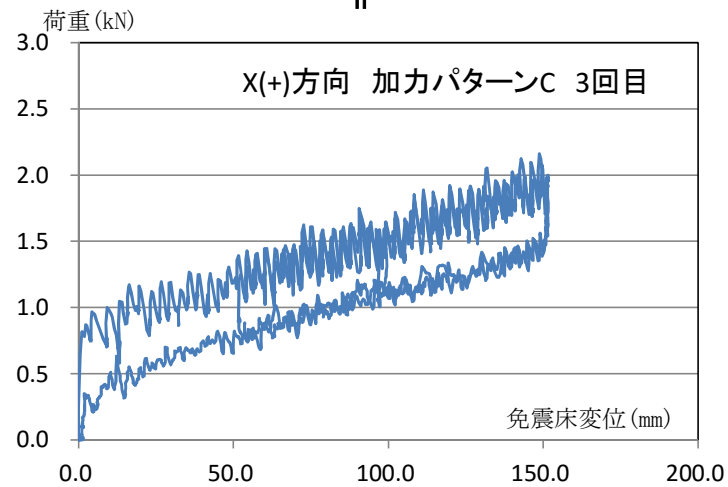
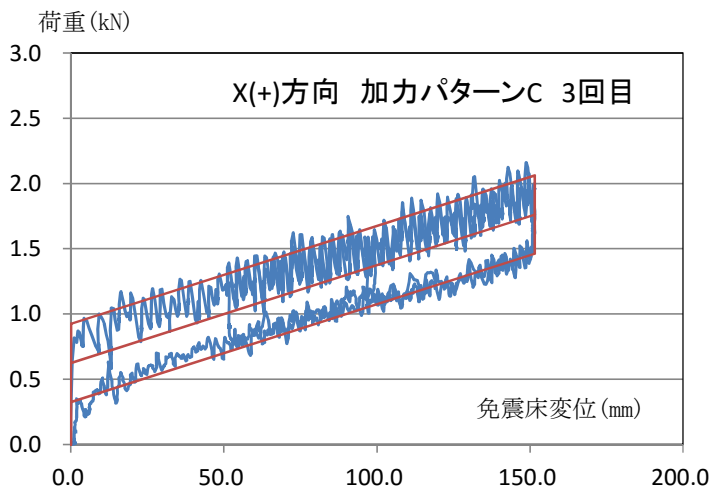
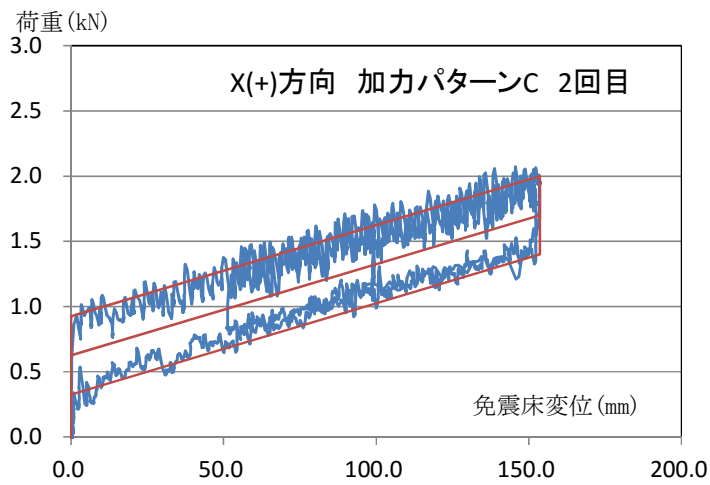
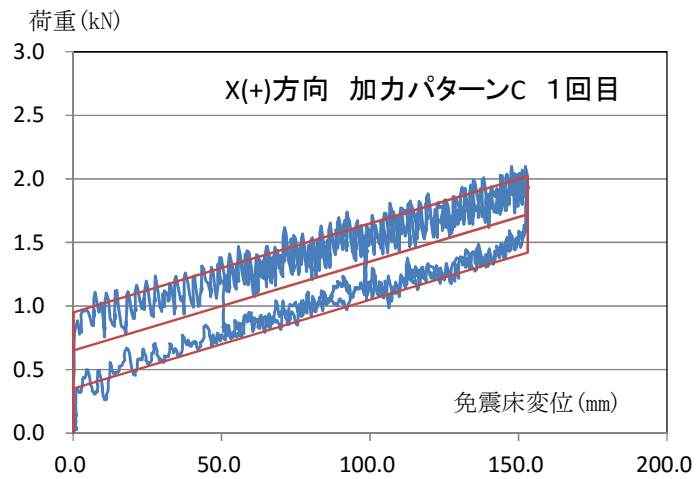
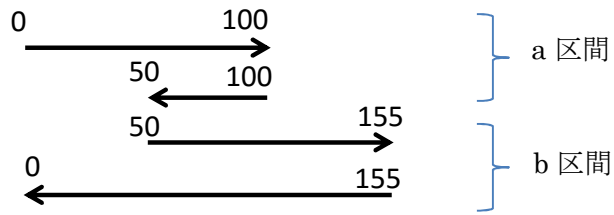


図 3-5-12 1 方向加力, X(+) 方向(加力パターン C) の例(3 回目)

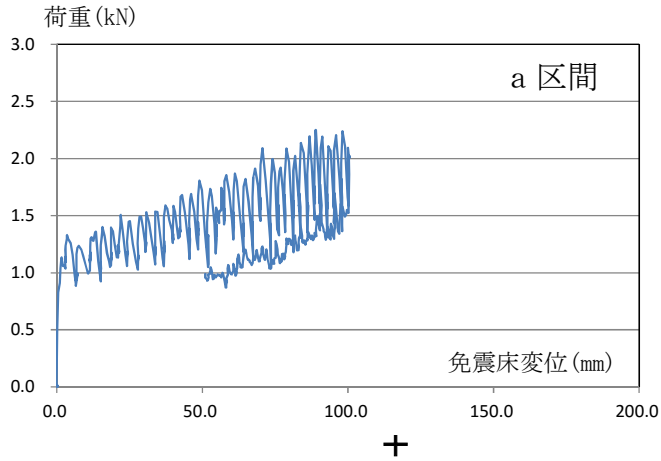


	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
X(+)-C-1	0.650	0.0070	0.600	0.0061
X(+)-C-2	0.625	0.0070	0.600	0.0061
X(+)-C-3	0.625	0.0075	0.600	0.0061
平均	0.633	0.0072	0.600	0.0061

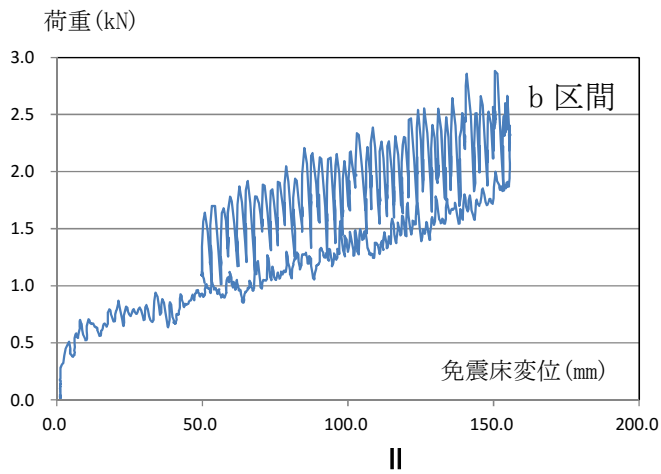
図 3-5-13 1 方向加力, X(+) 方向 (加力パターン C) による荷重変位関係



加力パターン B(シリンダヘッドの変位(mm))



+



||

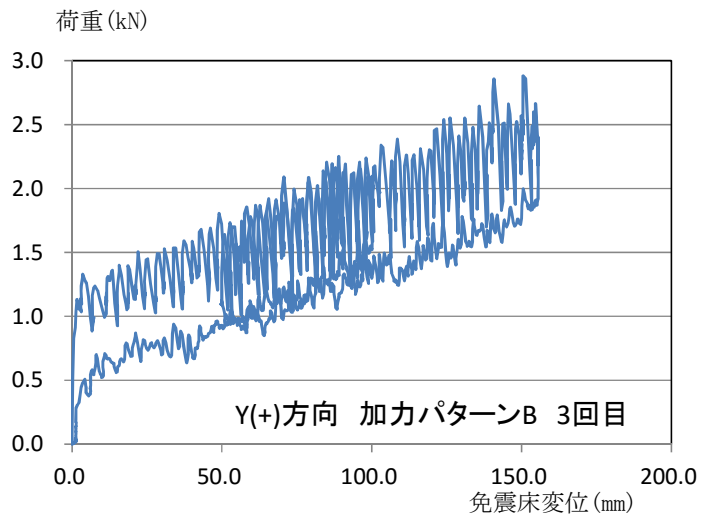
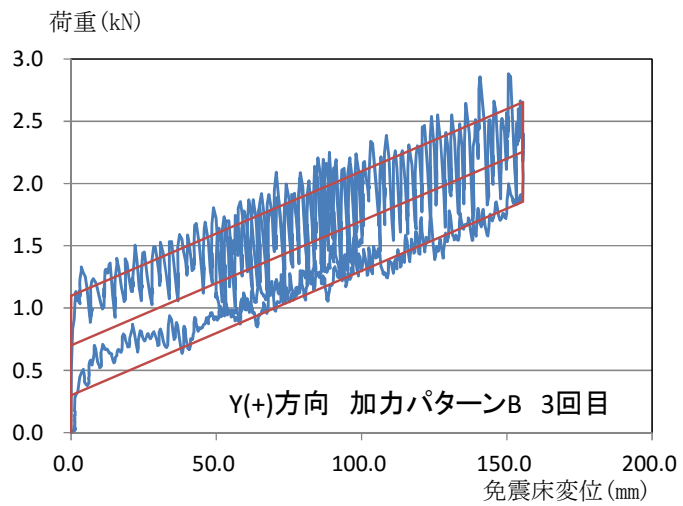
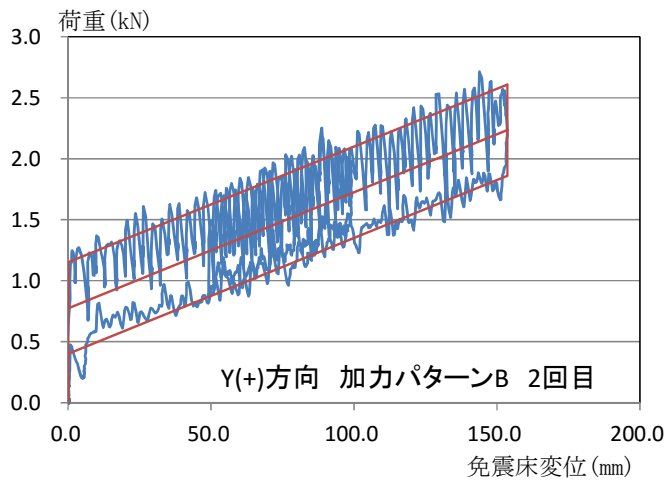
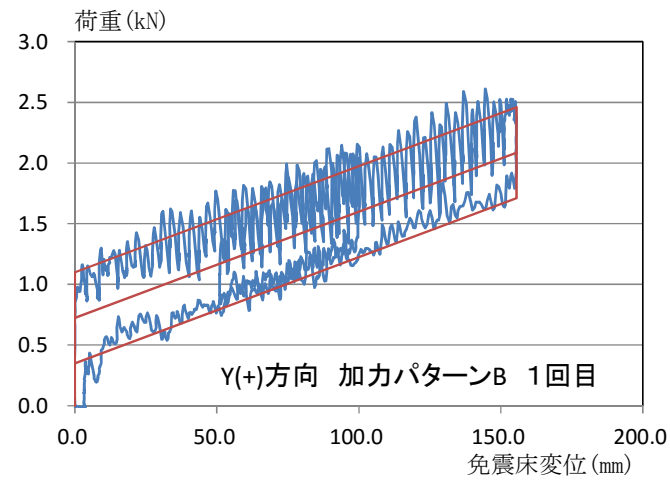
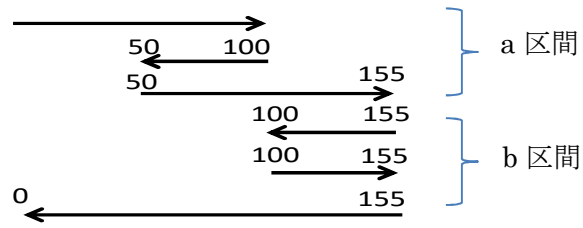


図 3-5-14 1 方向加力, Y(+) 方向(加力パターン B) の例(3 回目)

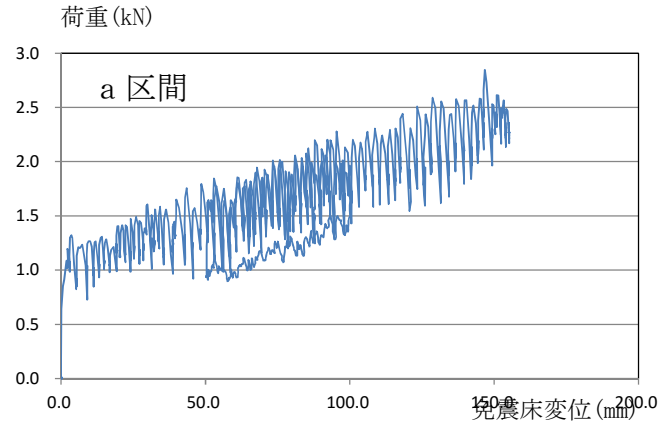


	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
Y(+)-B-1	0.725	0.0088	0.750	0.0077
Y(+)-B-2	0.775	0.0095	0.750	0.0077
Y(+)-B-3	0.700	0.0100	0.800	0.0082
平均	0.733	0.0094	0.767	0.0078

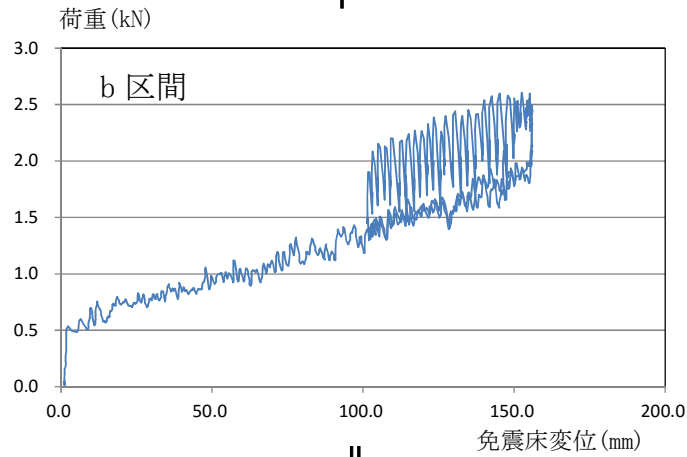
図 3-5-15 1 方向加力, Y(+) 方向(加力パターン B)による荷重変位関係



加力パターンC(シリンダヘッドの変位(mm))



+



||

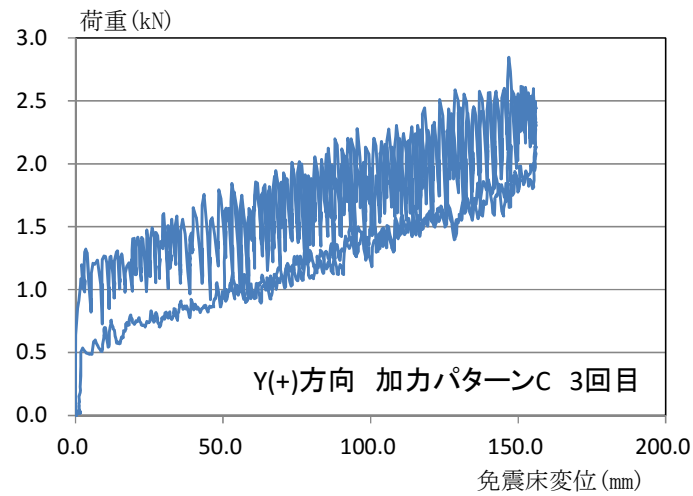
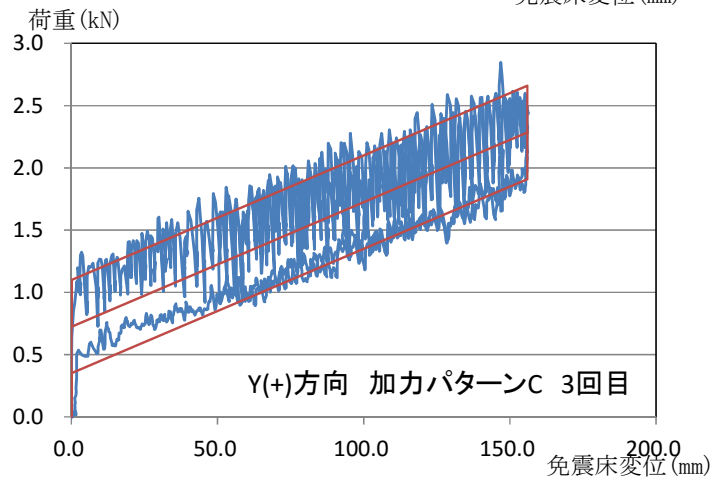
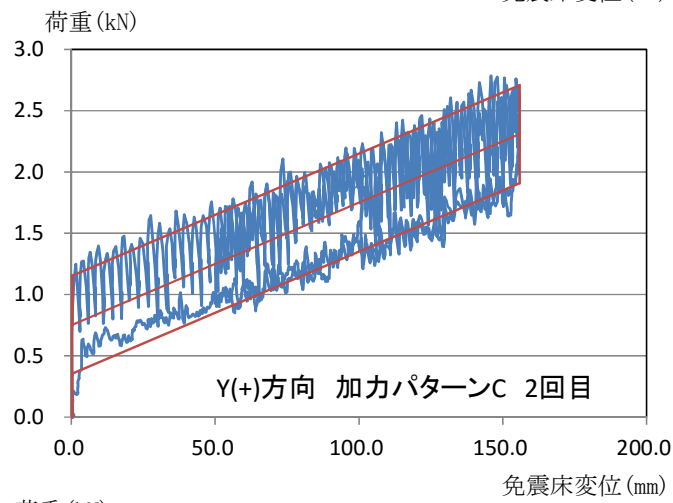
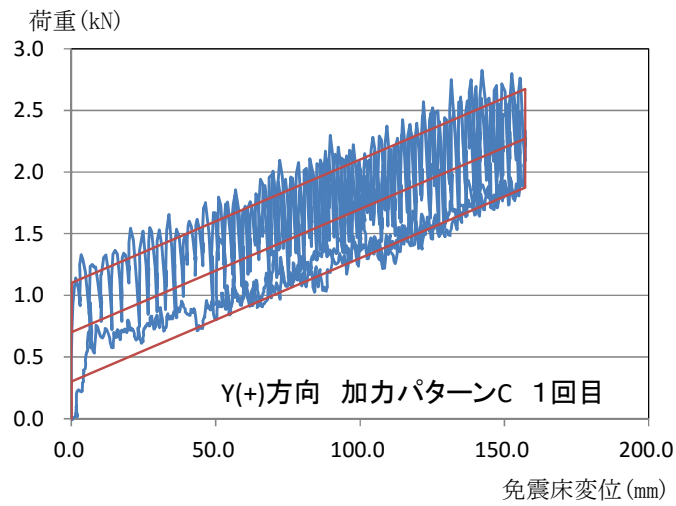


図 3-5-16 1 方向加力, Y(+) 方向(加力パターン C) の例(3 回目)



	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
Y(+)-C-1	0.700	0.0100	0.800	0.0082
Y(+)-C-2	0.750	0.0100	0.800	0.0082
Y(+)-C-3	0.725	0.0100	0.750	0.0077
平均	0.725	0.0100	0.783	0.0080

図 3-5-17 1 方向加力, Y(+) 方向(加力パターン C)による荷重変位関係

3.5.4 2方向同時加力

以下に掲載する表、図の一覧を示す。

表 3-5-7 2方向加力,各加力パターンの免震床変位方向の各パラメータの比較

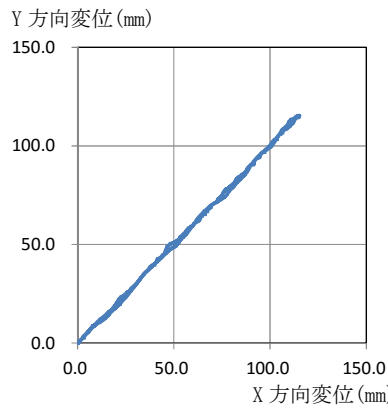
- 図 3-5-18 2方向加力,加力パターン①(X:Y=1:1)の例(3回目)
- 図 3-5-19 2方向加力,加力パターン②(X:Y=0.71:1)の例(3回目)
- 図 3-5-20 2方向加力,加力パターン③(X:Y=2:1)の例(3回目)
- 図 3-5-21 2方向加力,加力パターン④(X:Y=1:2)の例(3回目)
- 図 3-5-22 2方向加力,加力パターン①(X:Y=1:1)の荷重変位関係
- 図 3-5-23 2方向加力,加力パターン②(X:Y=0.71:1)の荷重変位関係
- 図 3-5-24 2方向加力,加力パターン③(X:Y=2:1)の荷重変位関係
- 図 3-5-25 2方向加力,加力パターン④(X:Y=1:2)の荷重変位関係

図 3-5-18～図 3-5-21 は加力パターン①～④による実験結果を示している。

図中の中段には、X、Y 方向の荷重とシリンダヘッドの変位計による変位を用いた荷重変位関係を示し、最下段には荷重として X、Y 方向荷重を 2 乗和平方根により合成した荷重、変位として免震床変位計による変位を用いた荷重変位関係を示している。加力パターン①(45度(+)方向)では、X、Y 方向に同一加力をするので、荷重は方向性による多少相違は見られるが、2 方向で荷重を負担している傾向を見ることができる。

一方、加力パターン②～④は、X、Y 方向のどちらかの方向に大きな変位を加える加力であるが、大きな変位となる方向の荷重変位のループ形状は大きくなっているが、小さい変位の方向では、荷重も小さくループ形状を小さくなっていることが分かる。最下段の 2 乗和平方根による荷重と免震床変位方向変位による荷重変位関係は、大きな変位方向の荷重変位のループ形状の影響が大きくなっていることがわかる。

図 3-5-22～図 3-5-25 は加力パターン①～④の 3 回の実験による 2 乗和平方根で合成した荷重と免震床変位方向の荷重変位関係を示している。各加力パターンの 3 回の実験においてほぼ同一の荷重変位関係が得られていることが分かる。また、各加力パターンでループ形状では、変位が 50mm 程度以下の比較的小さな変位の範囲で形状に多少相違が見られるが、より大きな変位の範囲では形状的な相違は小さくなっている。



シリンダヘッドの変位(2方向加力パターン① (X:Y=1:1))

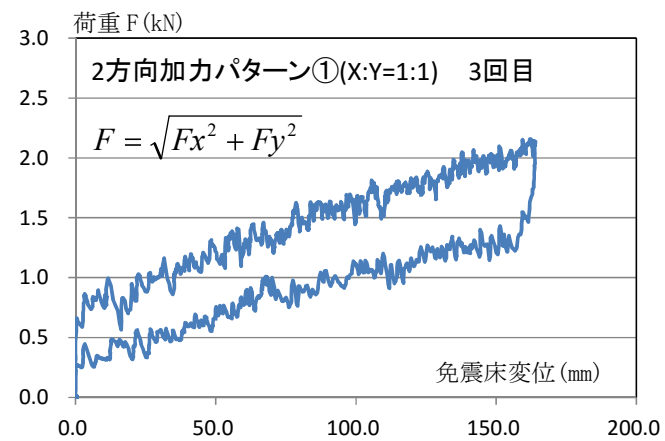
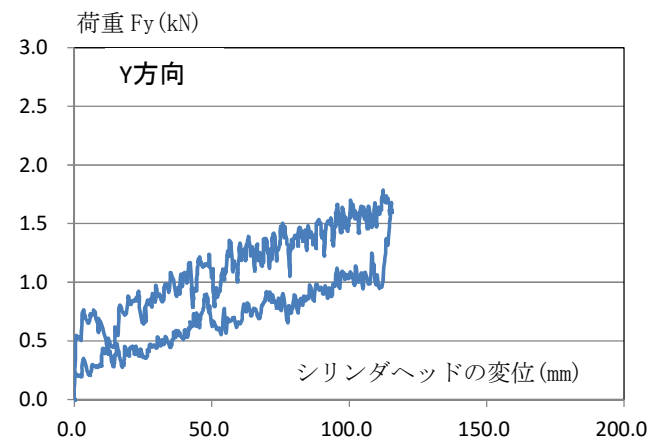
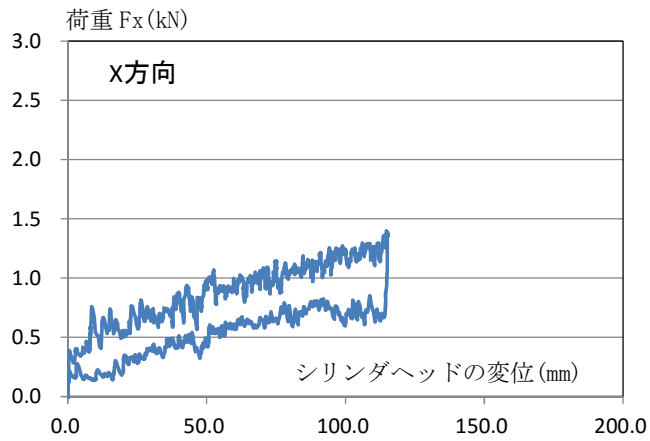
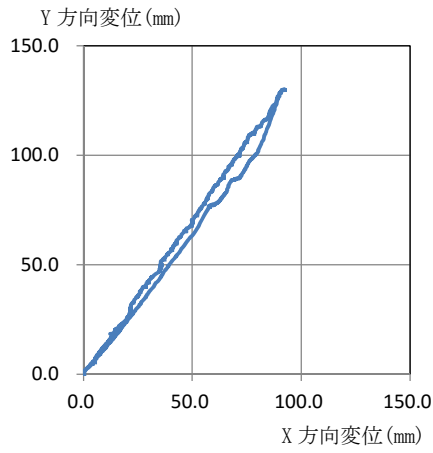


図 3-5-18 2方向加力, 加力パターン① (X:Y=1:1) の例(3回目)



シリンダヘッドの変位(2方向加力パターン②(X:Y=0.71:1))

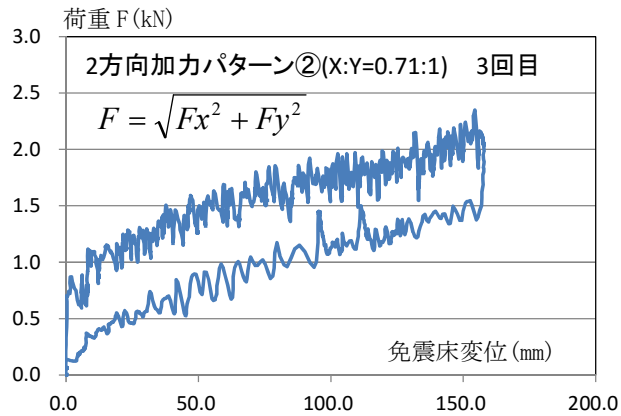
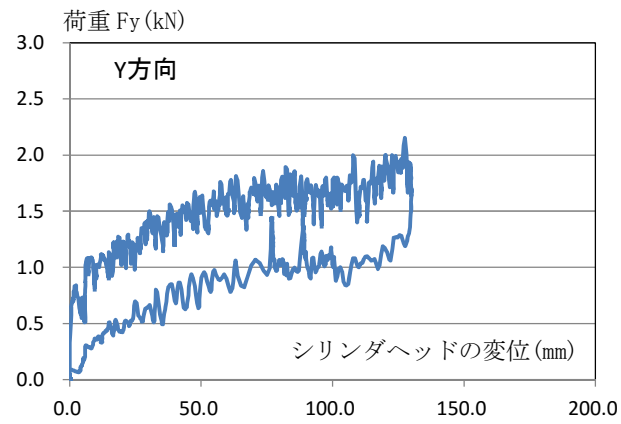
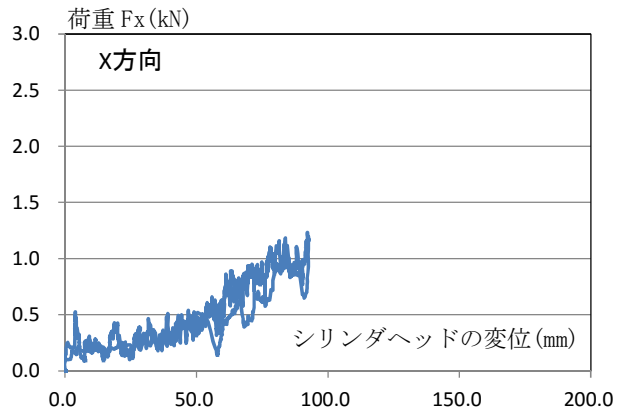
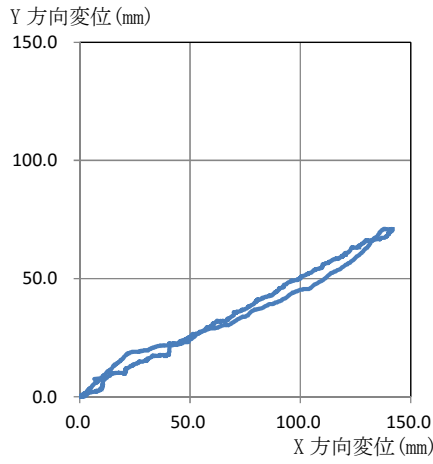


図 3-5-19 2方向加力, 加力パターン②(X:Y=0.71:1)の例(3回目)



シリンダヘッドの変位(2方向加力パターン③ (X:Y=2:1))

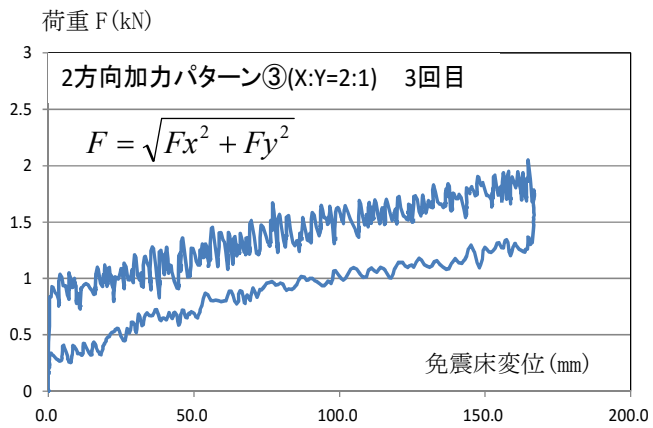
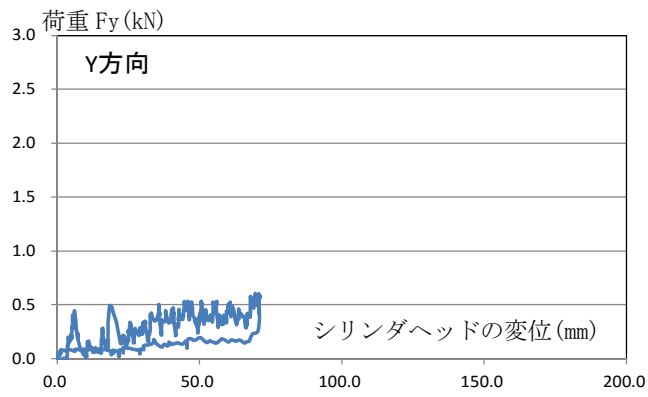
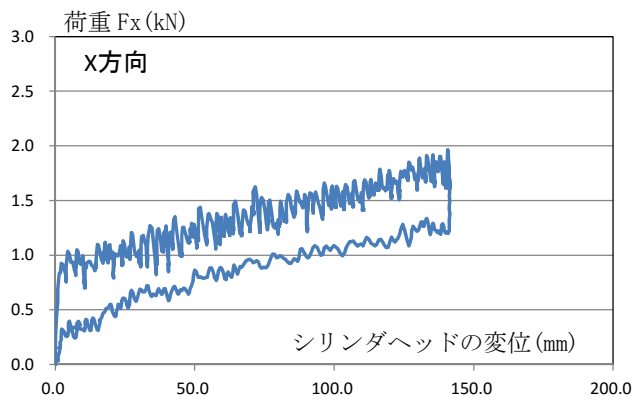
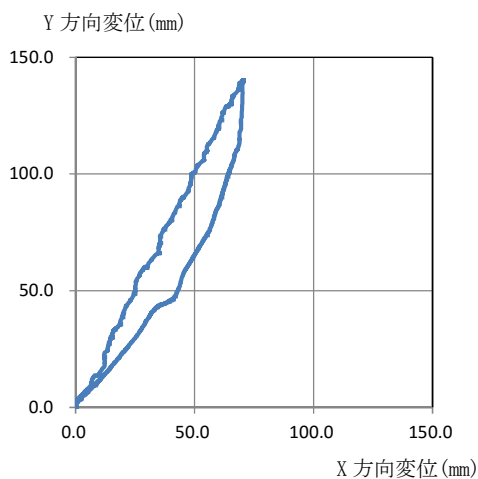


図 3-5-20 2方向加力,加力パターン③(X:Y=2:1)の例(3回目)



シリンダヘッドの変位(2方向加力パターン④ (X:Y=1:2))

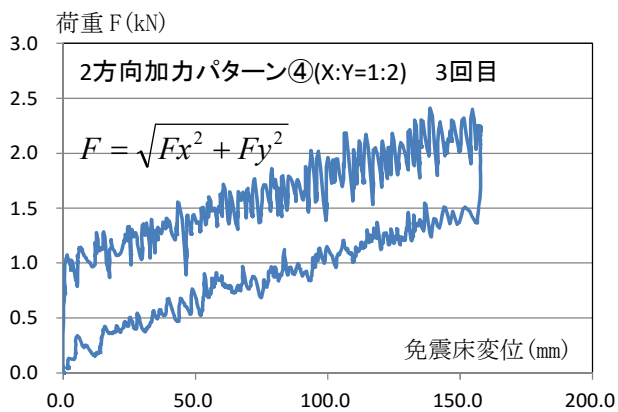
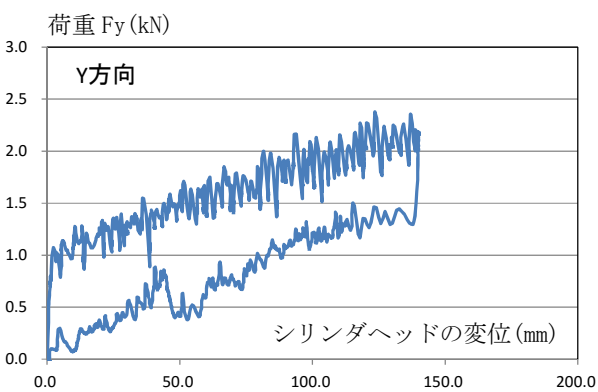
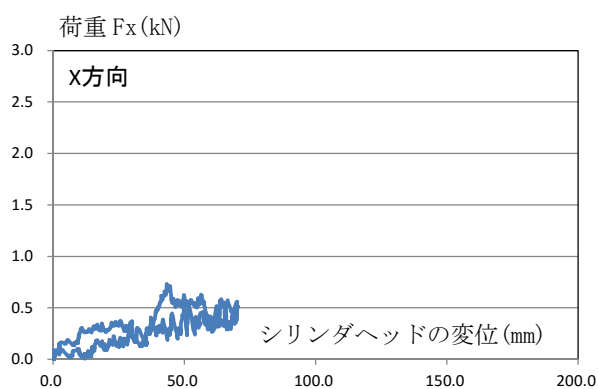
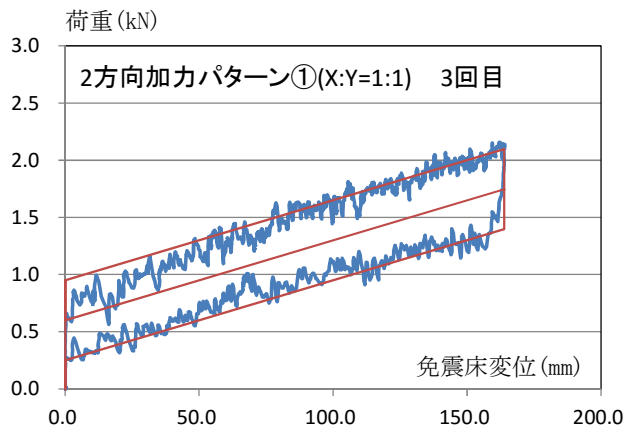
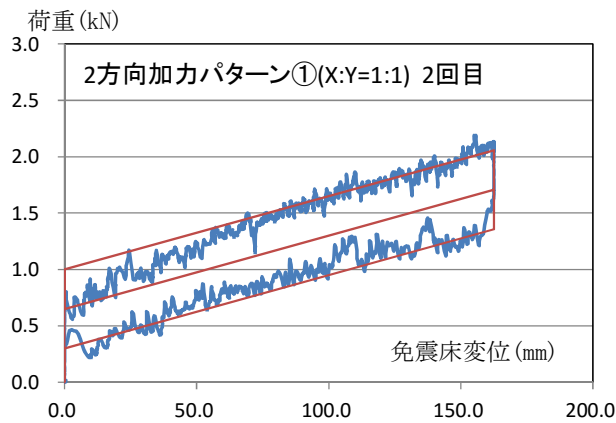
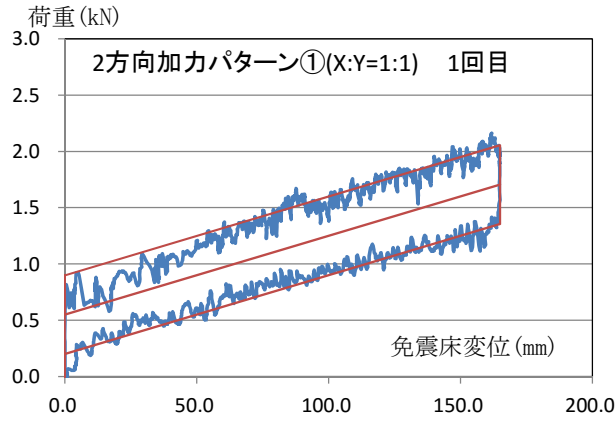
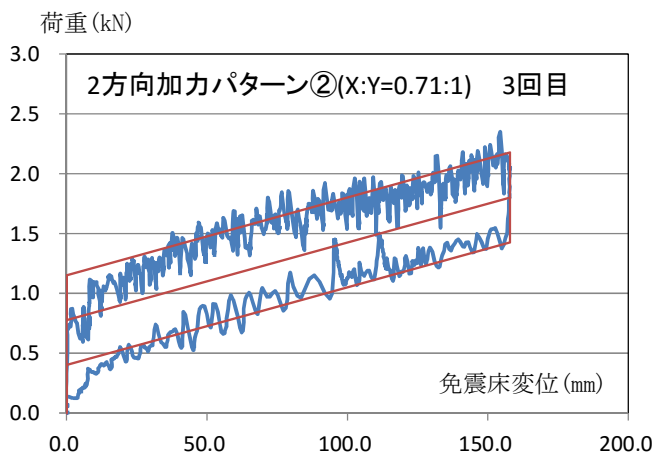
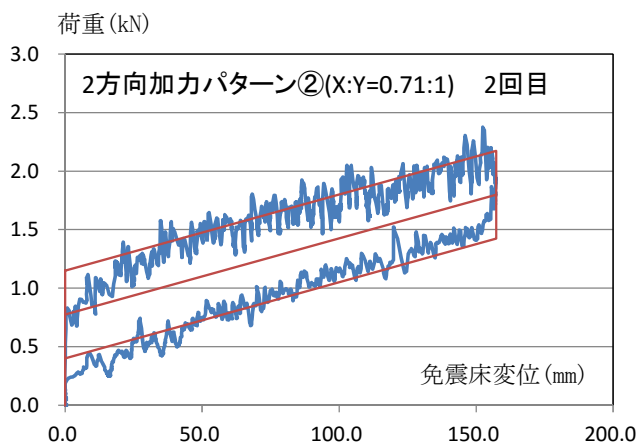
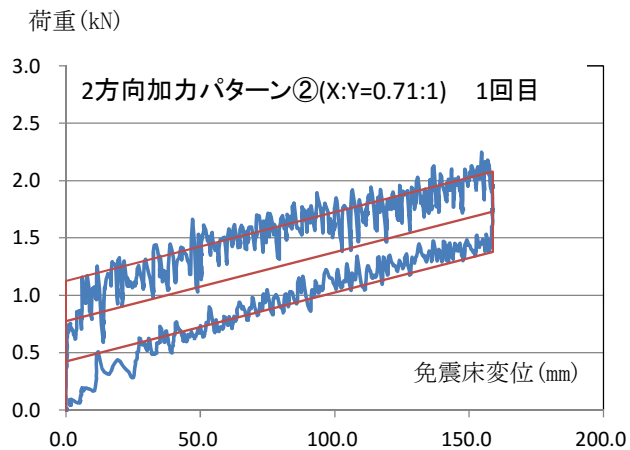


図 3-5-21 2方向加力, 加力パターン④(X:Y=1:2)の例(3回目)



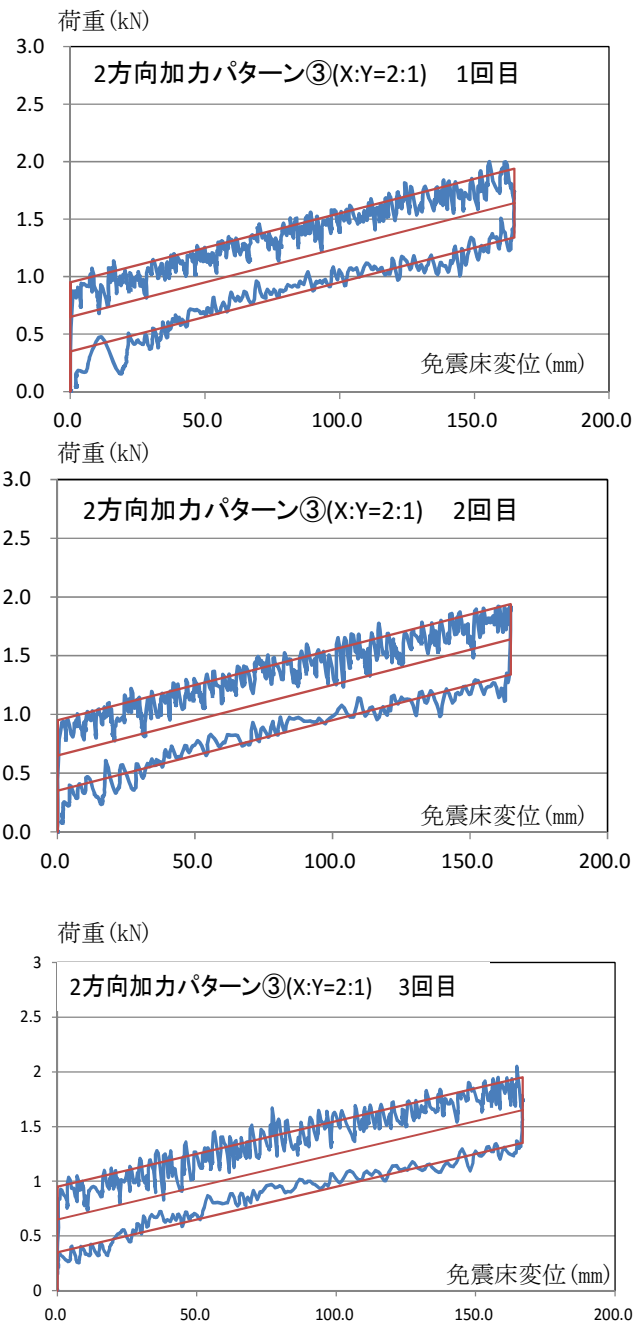
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
2方向加力パターン①-1	0.550	0.0070	0.700	0.0071
2方向加力パターン①-2	0.650	0.0065	0.700	0.0071
2方向加力パターン①-3	0.600	0.0070	0.700	0.0071
平均	0.600	0.0068	0.700	0.0071

図 3-5-22 2 方向加力, 加力パターン① (X:Y=1:1) の荷重変位関係



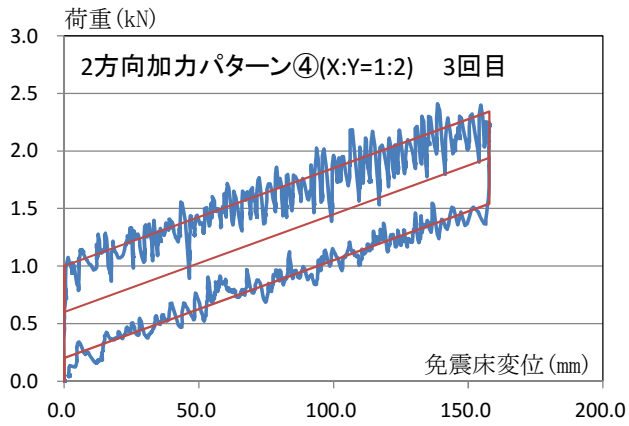
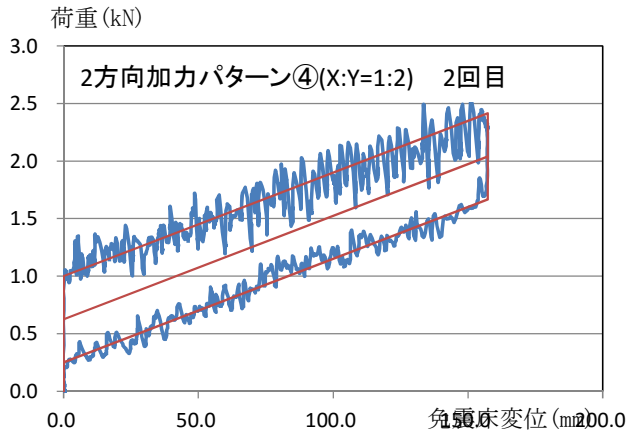
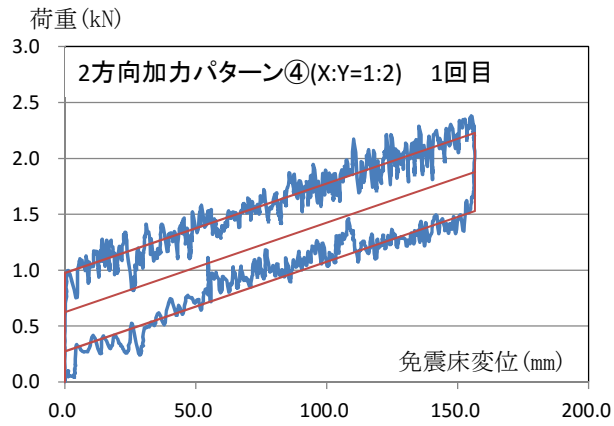
	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
2方向加力パターン②-1	0.775	0.0060	0.700	0.0071
2方向加力パターン②-2	0.775	0.0065	0.750	0.0077
2方向加力パターン②-3	0.775	0.0065	0.750	0.0077
平均	0.775	0.0063	0.733	0.0075

図 3-5-23 2 方向加力, 加力パターン② (X:Y=0.71:1) の荷重変位関係



	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
2方向加力パターン③-1	0.650	0.0060	0.600	0.0061
2方向加力パターン③-2	0.650	0.0060	0.600	0.0061
2方向加力パターン③-3	0.650	0.0060	0.600	0.0061
平均	0.650	0.0060	0.600	0.0061

図 3-5-24 2 方向加力, 加力パターン③ (X:Y=2:1) の荷重変位関係



	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力×2 (kN)	摩擦係数
2方向加力パターン④-1	0.625	0.0080	0.700	0.0071
2方向加力パターン④-2	0.625	0.0090	0.750	0.0077
2方向加力パターン④-3	0.600	0.0085	0.800	0.0082
平均	0.617	0.0085	0.750	0.0077

図 3-5-25 2 方向加力, 加力パターン④ (X:Y=1:2) の荷重変位関係

3.5.5 1方向加力と2方向加力の免震床変位方向の荷重変位関係の比較

以下に掲載する図の一覧を示す。

表 3-5-7 2方向加力,各加力パターンの免震床変位方向の各パラメータの比較

図 3-5-26 1方向加力と2方向加力の比較(45度(+))方向)

図 3-5-27 1方向加力と2方向加力の比較(対角(+))方向)

1方向加力の45度(+))方向と対角(+))方向の免震床の変位方向は、2方向加力の加力パターン①(45度方向)、②(対角方向)と同じであるので、図 3-5-26, 図 3-5-27 に荷重変位関係を重ね書きして比較する。比較は1, 2, 3回目の実験同士の比較している。45度(+))方向で、ループの傾きが1方向加力でより大きくなる傾向が見られるが、対角(+))方向では相違はその小さくなっている。

また、2方向加力の4つの加力ループにおいて、3回の実験結果の3つのパラメータを平均し結果を表 3-5-7 に示す。各加力パターンにおいて、数値の多少の相違はあるが、特に大きな相違は見られない。

これを、表 3-5-7 の参考に示した1方向加力の結果と比較すると、各パラメータ共に2方向加力から求めた値はより小さくなる傾向は見みられるが、図 3-5-26, 図 3-5-27 の45度(+))方向、対角(+))方向の荷重変位関係の重ね書きに見られるように、1方向加力の免震床変位方向の荷重変位関係は、概ね、2方向加力から合成した結果により概ね表現できると考えられる。

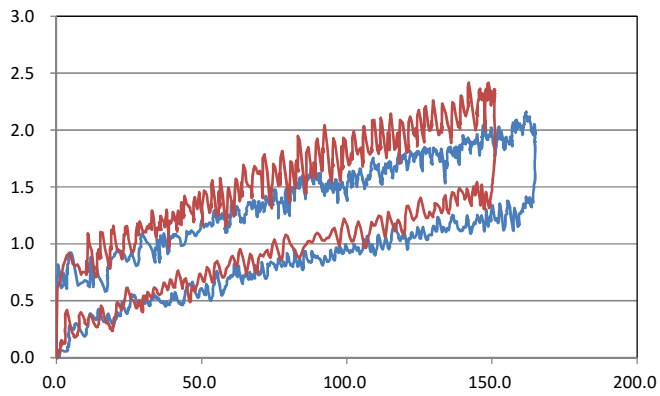
表 3-5-7 2方向加力,各加力パターンの免震床変位方向の各パラメータの比較

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
2方向加力パターン①の平均	0.600	0.0068	0.700	0.0071
2方向加力パターン②の平均	0.775	0.0063	0.733	0.0075
2方向加力パターン③の平均	0.650	0.0060	0.600	0.0061
2方向加力パターン④の平均	0.617	0.0085	0.750	0.0077
2方向加力の平均	0.660	0.0069	0.696	0.0071

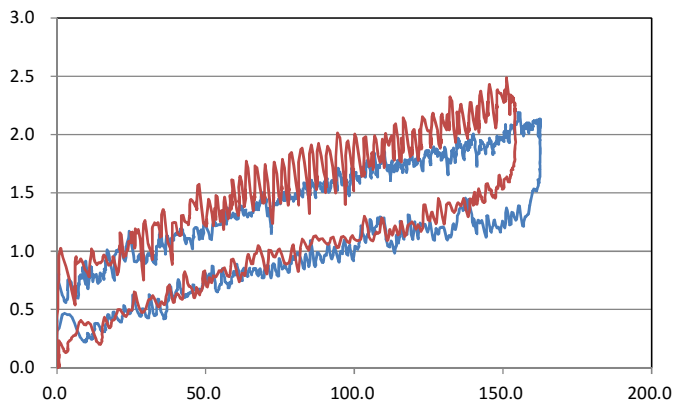
参考 1方向加力による各パラメータ(3.5.1節の結果)

	予引張力 (kN)	ばね定数 (kN/mm)	摩擦力x2 (kN)	摩擦係数
X(+))の平均	0.646	0.0070	0.692	0.0071
Y(+))の平均	0.817	0.0083	0.800	0.0082
45度(+))の平均	0.654	0.0083	0.792	0.0081
対角(+))の平均	0.692	0.0081	0.800	0.0082

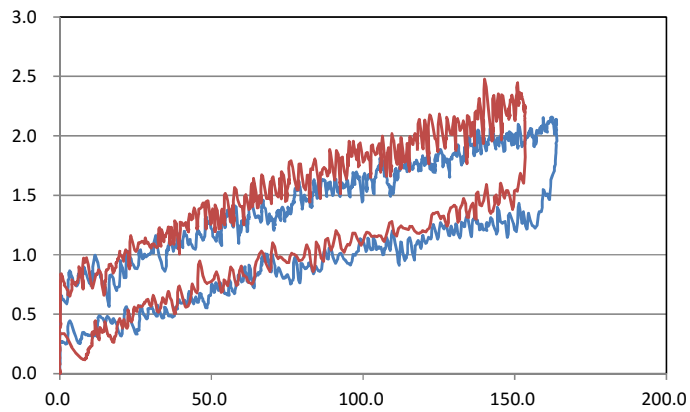
— : 1 方向加力 (45 度 (+) 方向)
— : 2 方向加力 (X:Y=1:1)



1 回目の加力実験を比較



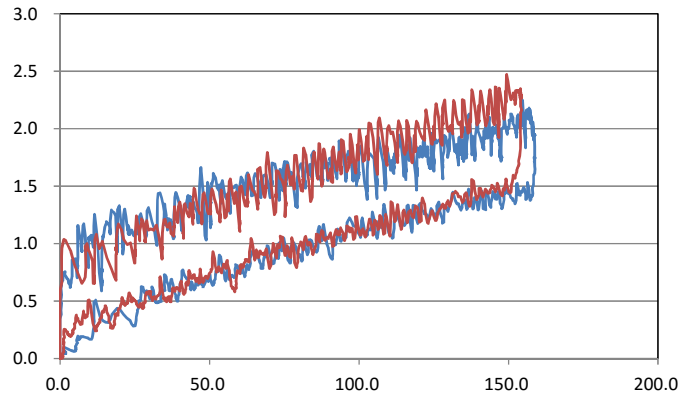
2 回目の加力実験を比較



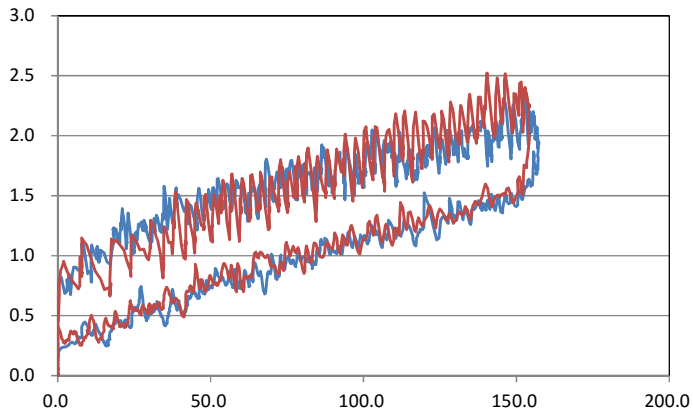
3 回目の加力実験を比較

図 3-5-26 1 方向加力と 2 方向加力の比較 (45 度 (+) 方向)

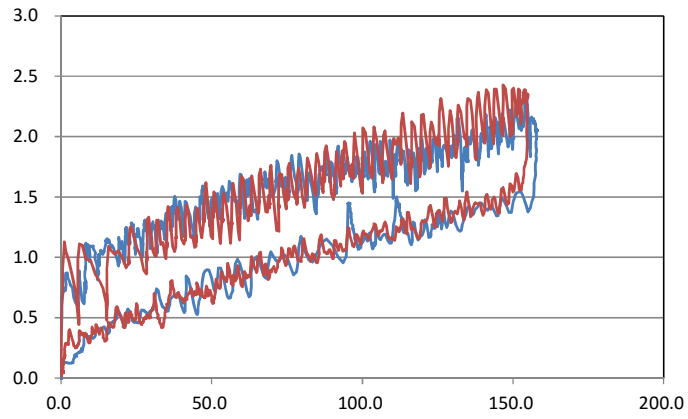
— : 1 方向加力 (45 度 (+) 方向)
— : 2 方向加力 (X:Y=1:1)



1 回目の加力実験を比較



2 回目の加力実験を比較



3 回目の加力実験を比較

図 3-5-27 1 方向加力と 2 方向加力の比較 (対角 (+) 方向)

3.6 水平方向の加力実験のまとめ

水平方向の加力実験により以下のことが知見として得られた。

- 1) 1方向加力実験の荷重変形関係は加力方向により、各パラメータに多少の相違が見られた。しかし、その荷重変形関係の方向による相違はそれほど大きくなく、各方向でほぼ同様の特性が得られていた(図 3-6-1)。
- 2) 任意方向への1方向加力による荷重変形関係は、2方向同時加力を行った基準軸である X、Y 軸の荷重変形関係から、概ね、評価することが出来た。このことは、より多くの成分に分解可能であることを示唆しているものと考えられる(図 3-6-2)。

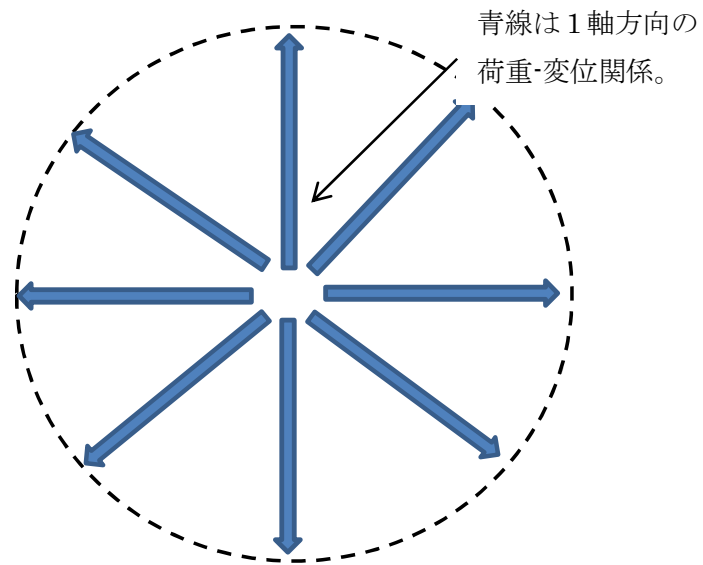


図 3-6-1 荷重変形関係に方向性が見られないことのイメージ図

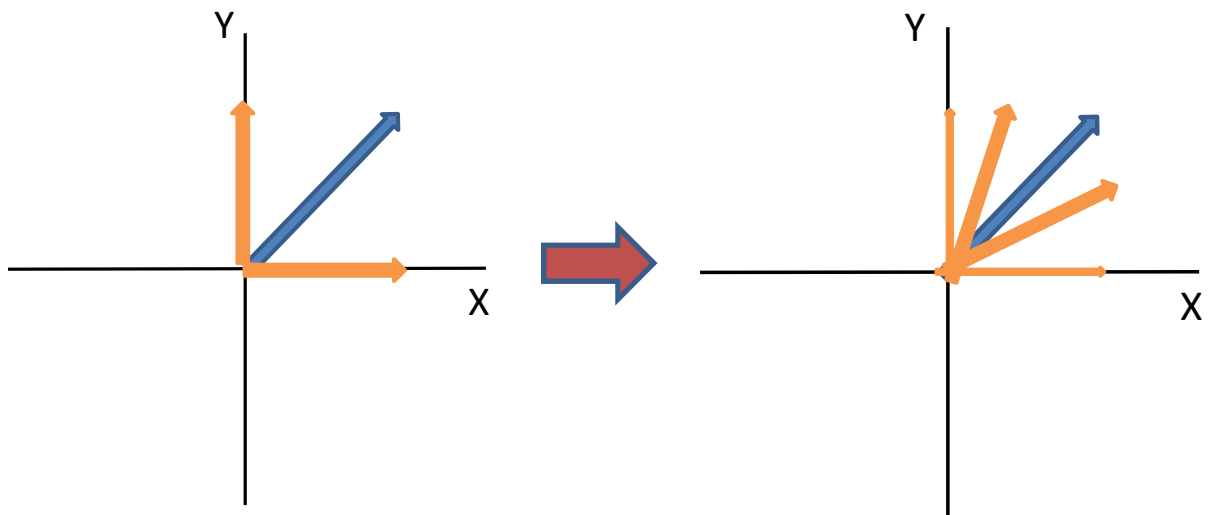


図 3-6-2 1 方向の荷重変形関係を基準方向により分解できることのイメージ図

4. 3次元振動モデルによる地震応答解析

4.1 免震床の3次元振動解析モデル

免震床の3次元振動解析モデルを図4-1-1に示す。

水平方向の復元力特性は、加力実験結果の3.6節で述べたX,Y方向の連成を考慮し、MSS(Multiple Shear Spring)モデルで表現する。

鉛直方向(Z方向)は独立のスプリングモデルを設定する。

各方向の減衰には、各方向に設置されているダンパーを設定する。

(1) MSSモデル

MSSモデルは、図4-1-2に示すように1軸の非線形特性を有する多数のせん断ばねを平面内に等間隔の角度で向きを変えて重ねて配置したモデルである。MSSモデルにおける各ばねの復元力特性は、1方向の剛性、降伏強度等と等価になるように設定される。本解析では分割数は16とした。

MSSモデルについては付録-Bとして説明を添付する。

(2) その他の要素の設定

鉛直方向のスプリング特性、および水平、鉛直方向の減衰特性は昨年度の解析と同一とする。

鉛直方向のスプリングは弾性とし、図4-1-3に示す特性を4本の支障分として設定する。水平方向の減衰定数は図4-1-4に示すように、各方向のオイルダンパー2本分として設定している。鉛直方向の減衰特性は、図4-1-5に示すように速度の0.53乗に比例する特性を、Z方向の粘性ダンパー4本分を考慮して設定している。

また、免震床の鉄骨部分の粘性減衰として、昨年鉛直方向起振器実験の結果を参照して、2Hzで減衰定数 $h=0.0091$ を初期剛性比例として設定する。

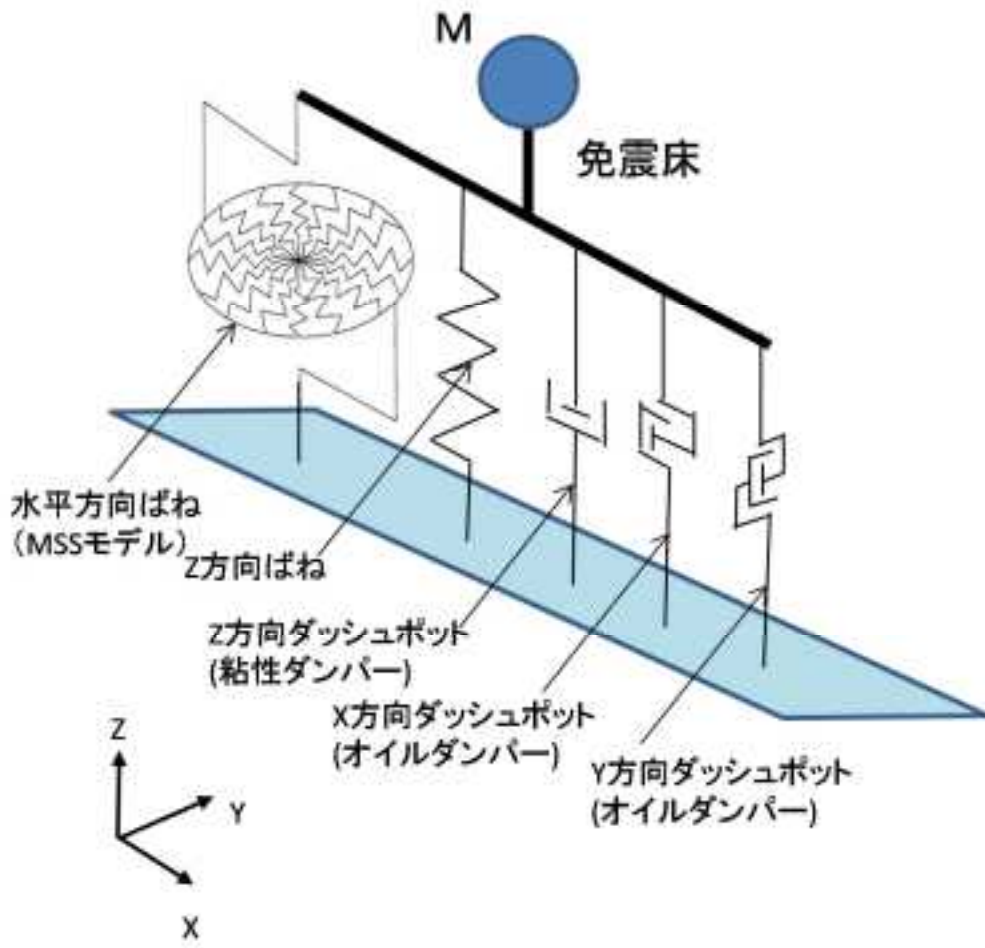
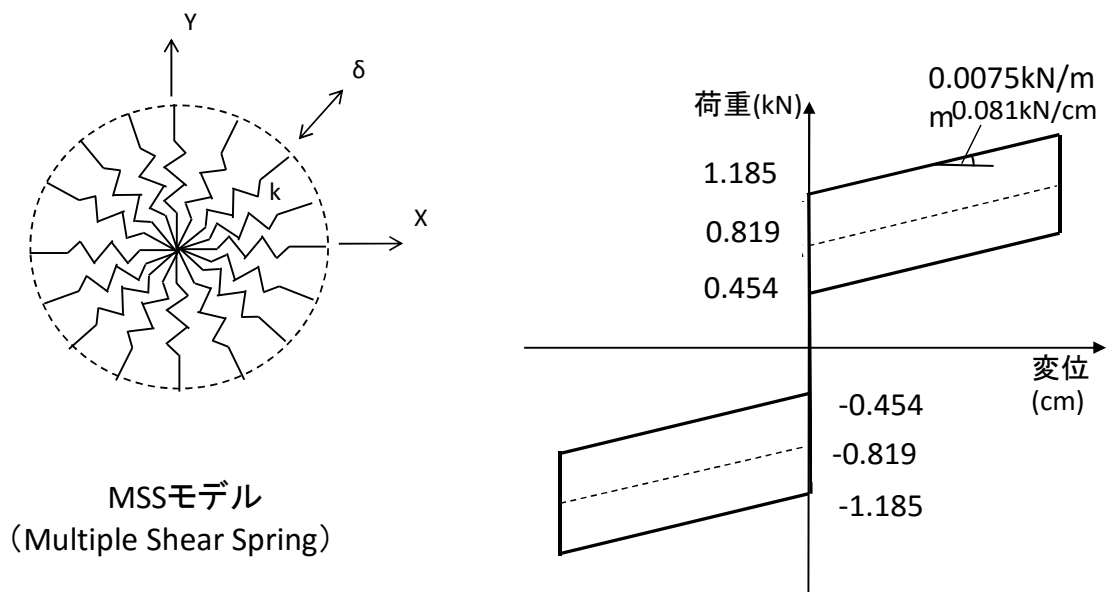


図 4-1-1 免震床の 3 次元振動解析モデル



MSSモデル
(Multiple Shear Spring)

図 4-1-2 免震床の 3 次元振動解析モデル

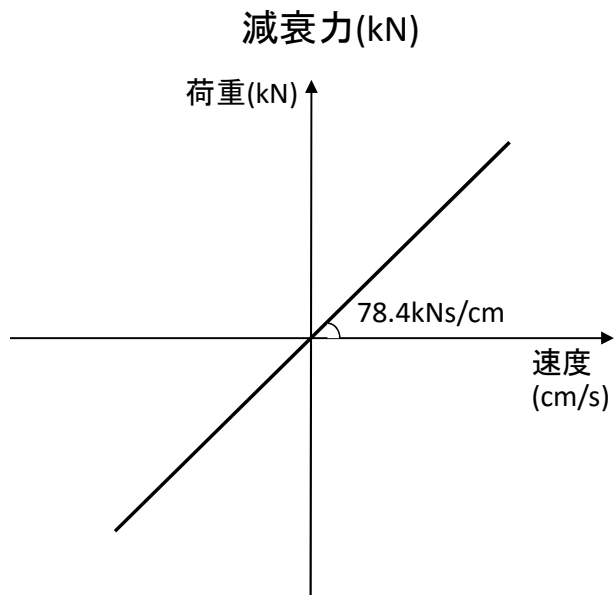


図 4-1-3 水平方向の減衰特性

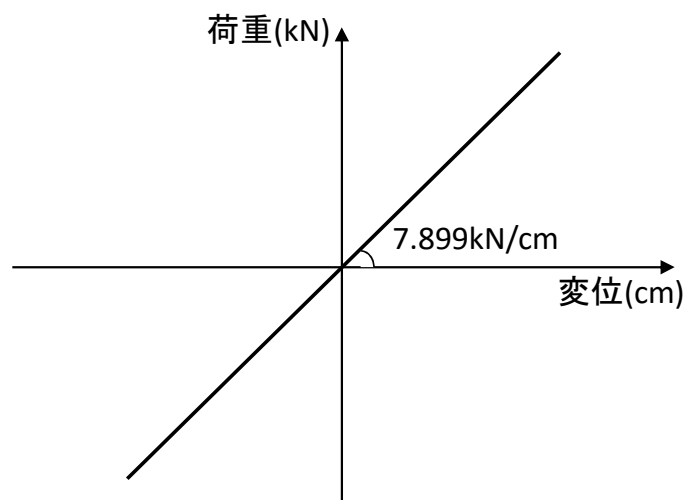


図 4-1-4 水平方向の減衰特性

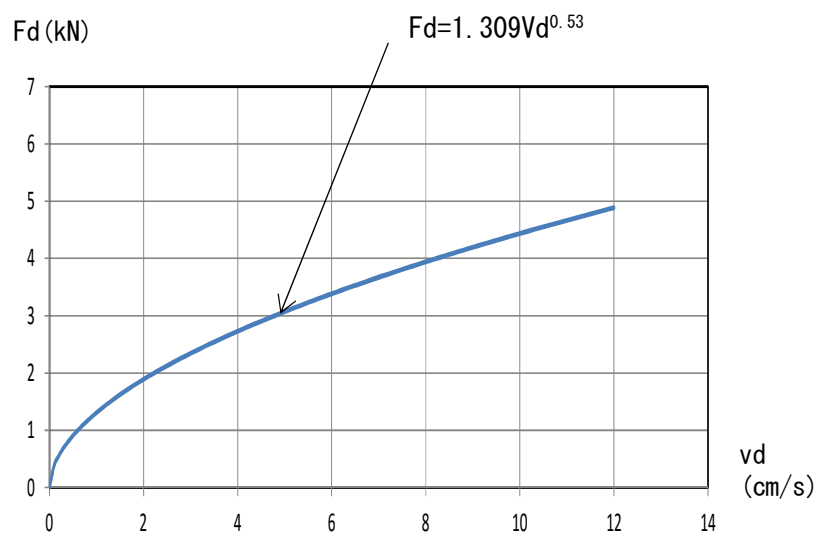


図 4-1-5 鉛直方向の減衰特性

4.2 2011年長野県北部地震の記録による解析モデルの妥当性検討

新潟工科大学原子力・耐震構造研究センターの3次元免震床では常時地震観測が行われており、2011年3月12日に発生した長野県北部地震による記録が観測されている。

観測記録は固定床と免震床における絶対加速度で、水平2方向と鉛直方向の3成分が観測されている。固定床とは免震床が設置されているB1Fの免震床直下の床を示している。

地震応答解析では、固定床の観測記録を解析モデルに入力し、免震床での応答解析結果を観測記録と比較することにより、免震床振動解析モデルの妥当性を検討する。

3次元解析モデルなので、3成分の同時入力解析を行う。水平のX,Y方向では、MSSモデルにより連成効果が入っているが、Z方向は独立である。

結果は加速度時刻歴と加速度応答スペクトルについて比較する。加速度応答スペクトルは減衰定数1%と5%の2種類について示す。

4.2.1 固定床の地震観測記録

2011年長野県北部地震の固定床と免震床での観測記録の加速度時刻歴を図4-2-1に、加速度応答スペクトルを図4-2-2に示す。各図は、X方向、Y方向、Z方向について示している。

最大加速度は時刻歴の図中に示しているが、水平方向では、Y方向がX方向より 20cm/s^2 程度大きくなっている。また、Z方向は、水平方向の1/2程度である。

加速度応答スペクトルでは、X,Y方向共に0.15s~0.2s程度の周期成分が、Z方向では0.1~0.2s程度の成分が卓越している。これは、後述する固有値解析を参照するとそれぞれ建物の1次周期に相当していると考えられる。

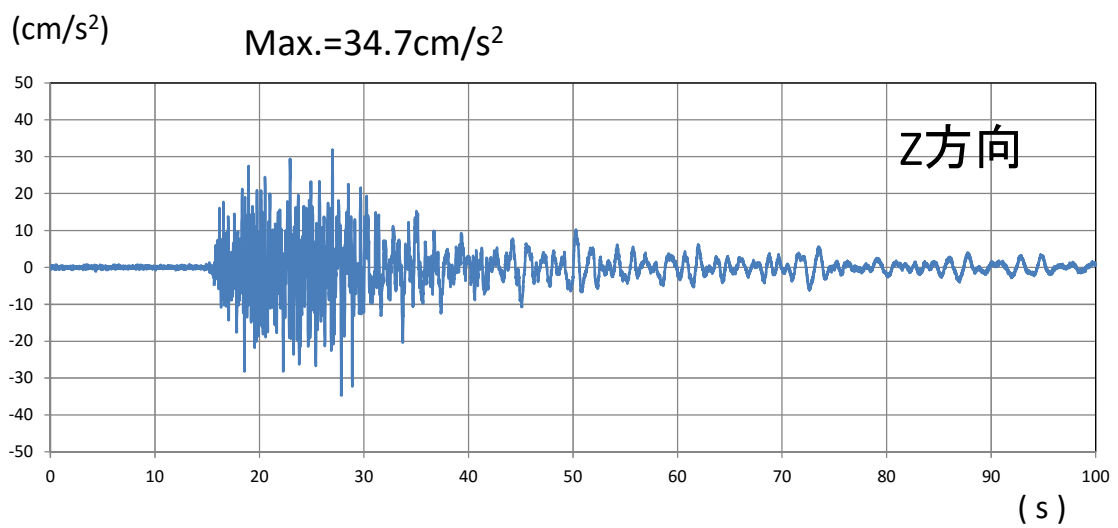
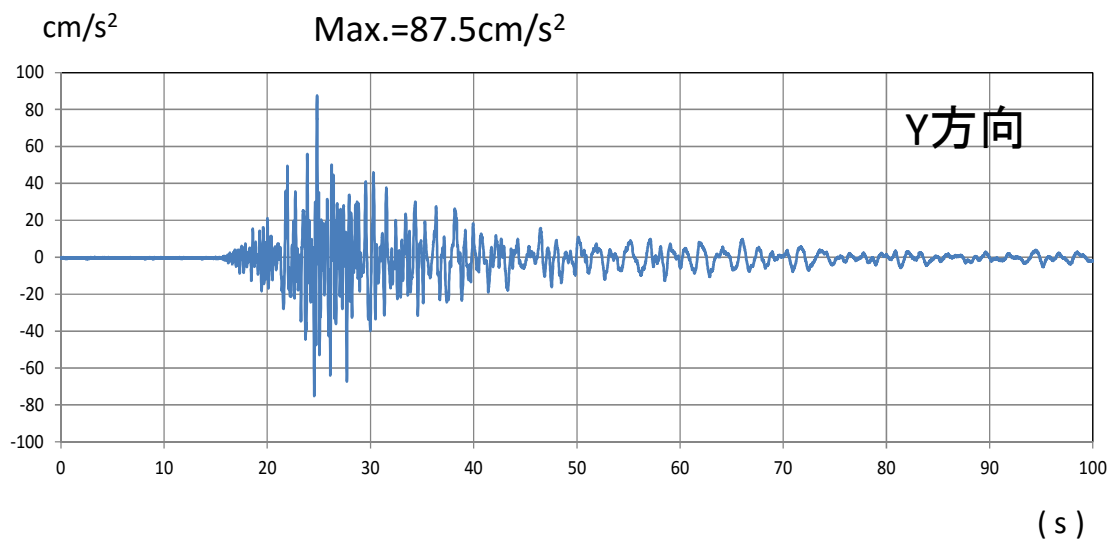
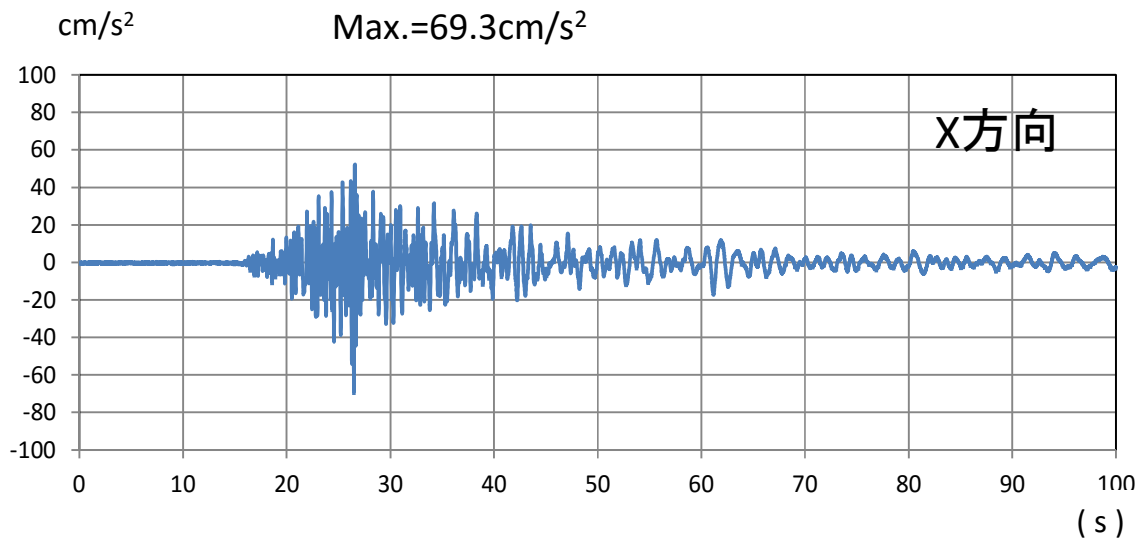


図 4-2-1 水平方向の減衰特性

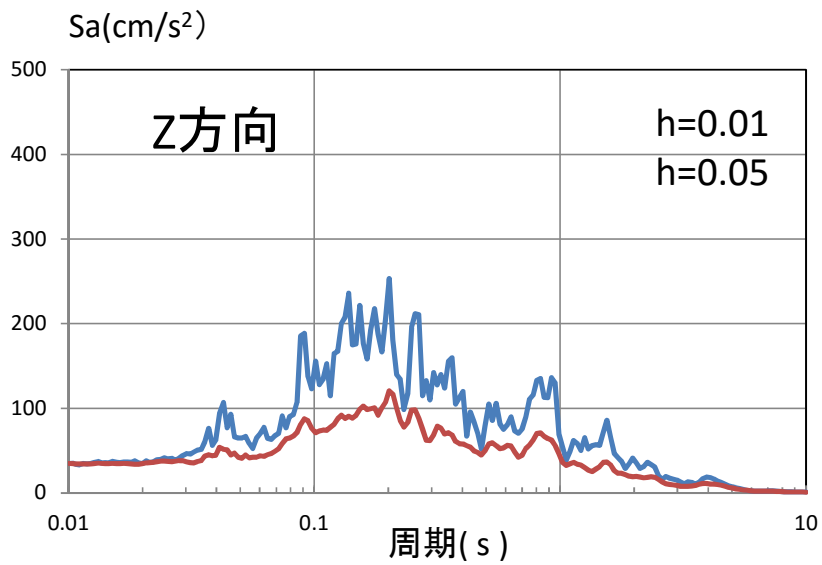
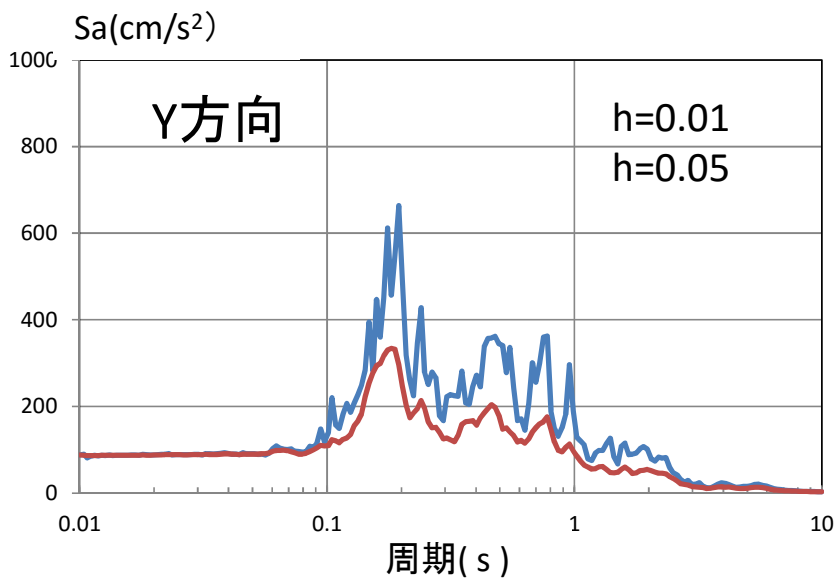
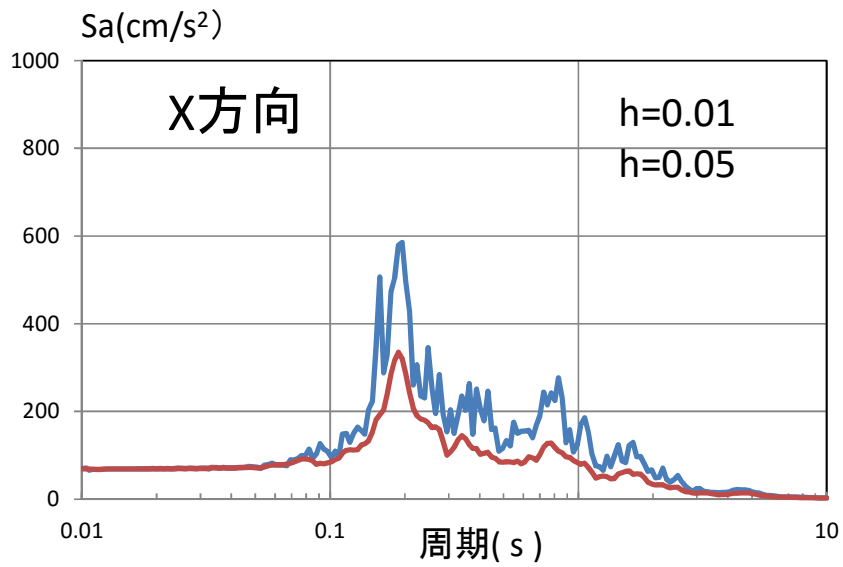


図 4-2-2 固定床の加速度応答スペクトル

4.2.2 免震床の地震観測記録と地震応答解析結果の比較

掲載した表、図を整理して以下に示す。

表 4-2-1 2011 年長野県北部地震による観測と解析の最大値比較

図 4-2-3 免震床の X 方向加速度時刻歴の比較

図 4-2-4 免震床 X 方向加速度応答スペクトルの比較

図 4-2-5 免震床の X 方向相対変位時刻歴の比較

図 4-2-6 免震床 Y 方向加速度時刻歴の比較

図 4-2-7 免震床 Y 方向加速度応答スペクトルの比較

図 4-2-8 免震床の Y 方向相対変位時刻歴の比較

図 4-2-9 免震床の加速度オービットの比較

図 4-2-10 免震床の相対変位オービットの比較

図 4-2-11 免震床 Z 方向加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(解析値)

図 4-2-12 免震床 Z 方向相対変位時刻歴(解析値)

(1) 水平方向(X方向、Y方向)

表 4-2-1 の最大加速度の一覧より、免震床(実測値、解析値)の最大加速度は固定床に対して 1/2 程度となっているが分かる。また、加速度時刻歴において、固定床の時刻歴波形で大きな振幅部分が免震床では低減されていることが分かる。加速度応答スペクトルでは、観測結果、解析結果共に比較的短周期(0.3s 程度以下)で低減が大きく見られる。また、固定床の応答スペクトルに見られる周期 0.2s 直前の建物の 1 次周期に相当するピークが減されている形状を解析結果は、よく再現できていると考えられる。

加速度時刻歴をみると、概略の波形形状は、解析結果を観測結果と似た形状が得られている。しかし、特に、Y 方向において、解析の最大加速度は観測値より、 10cm/s^2 程度小さくなっている。これは、両者の加速度応答スペクトルかの比較に見られるように、周期 0.06s~0.1s 間の優勢な成分が解析結果には見られないことが一因していると考えられる。

最大層間変位については、時刻歴波形等の比較を示した。観測値の変位波形は絶対加速度を数値積分することによって算出したものである。相対変位波形においても似た波形形状が得られている。また、この地震による免震床の最大層間変位は、1cm 程度であった。加力実験から評価した荷重-変位関係は主に 5cm 以上の大きな変位振幅を想定して設定したが、本観測結果は比較的小さな振幅レベルの結果であったが、地震応答解析結果から、今回設定した免震床振動解析モデルは概ね妥当であると判断される。

図 4-2-9 の加速度オービット、図 4-2-10 の相対変位オービットにおいても解析結果、観測結果の傾向をとらえているものと考えられる。

(2) 鉛直方向(Z方向)

2011年3月12日の長野県北部地震の時には、設置されていた鉛直方向のオイルダンパーには不備があったと考えられるので、免震床での観測記録は不採用とし、免震床の応答解析結果のみを示す。

固定床の最大加速度は 34.7cm/s^2 で免震床は 29.0cm/s^2 でほぼ同程度である。また、固定床および免震床の加速度時刻歴及び加速度応答スペクトルでは、大きさは免震床で多少小さくなっているがその形状は良く似ている。本免震床の鉛直方向の固有周期は 0.5s (2Hz)付近であるので、この成分の増幅が見られないことは、鉛直方向のダンパーの減衰効果によって増幅をおさえているものと考えられる。

また、解析によるZ方向の相対変位は最大で 0.05cm 程度であった。

表 4-2-1 2011年長野県北部地震による観測と解析の最大値比較

	最大加速度(cm/s^2)			最大相対変位(cm)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Y方向
固定床	69.3	87.5	34.7	—	—	—
免震床(観測値)	34.2	48.8	—	0.77	0.82	—
免震床(解析値)	31.1	37.4	29.0	0.87	1.09	0.051

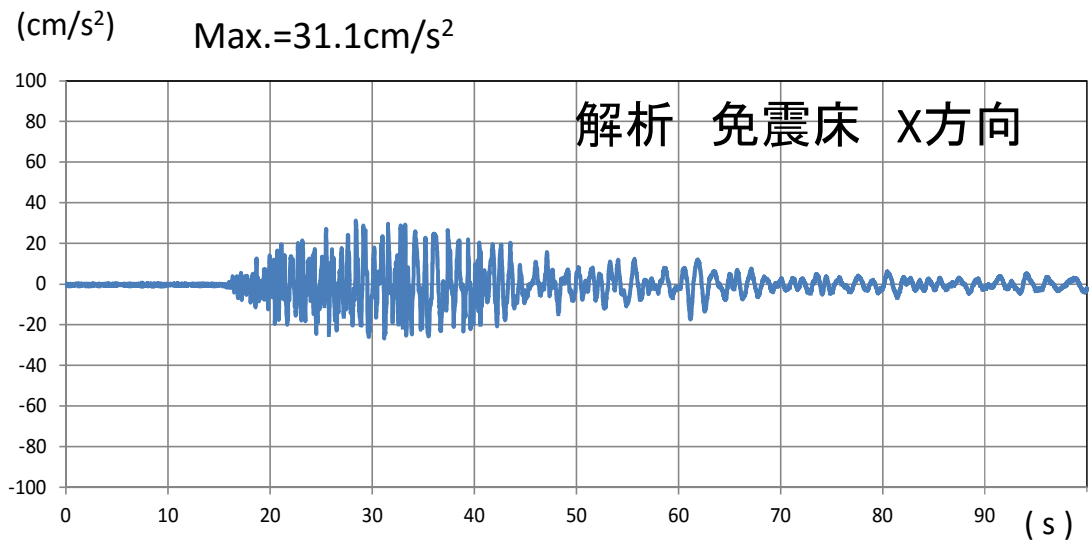
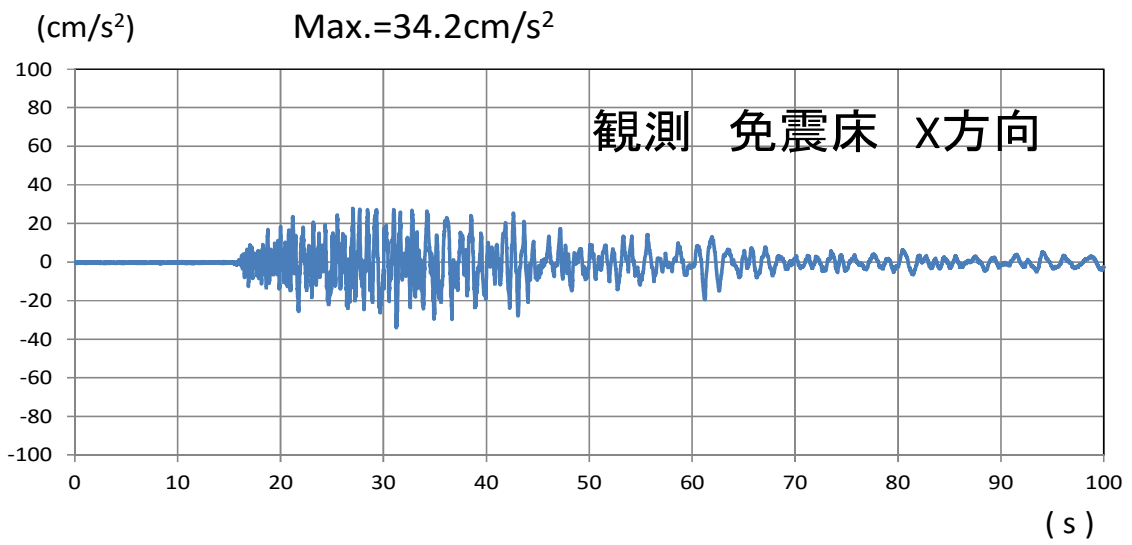


図 4-2-3 免震床の X 方向加速度時刻歴の比較

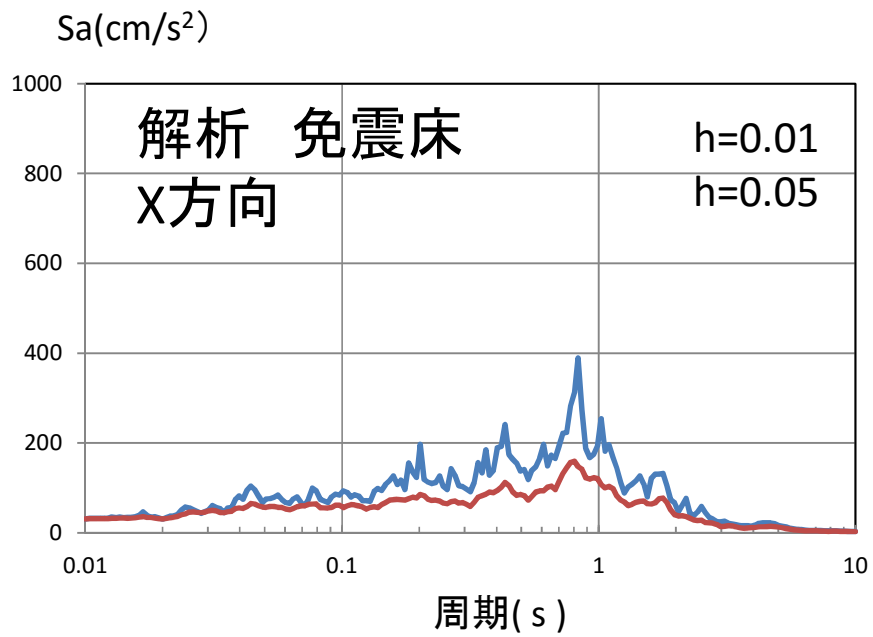
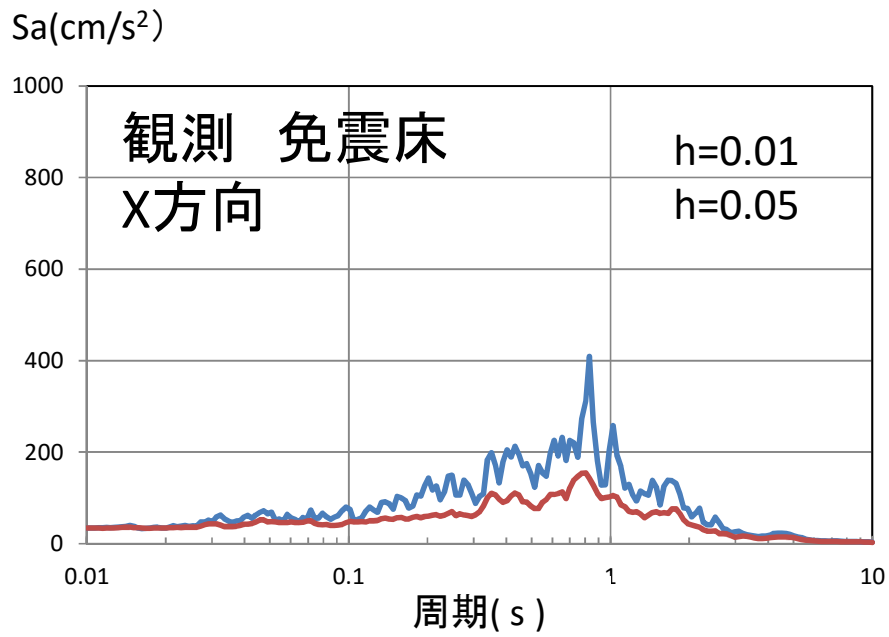


図 4-2-4 免震床 X 方向加速度応答スペクトルの比較

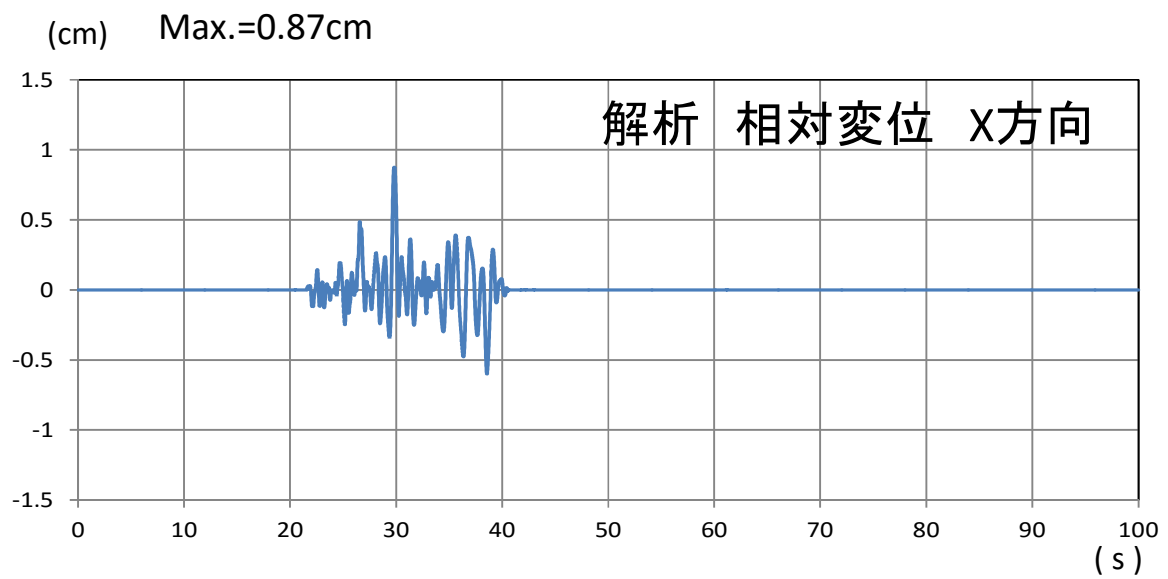
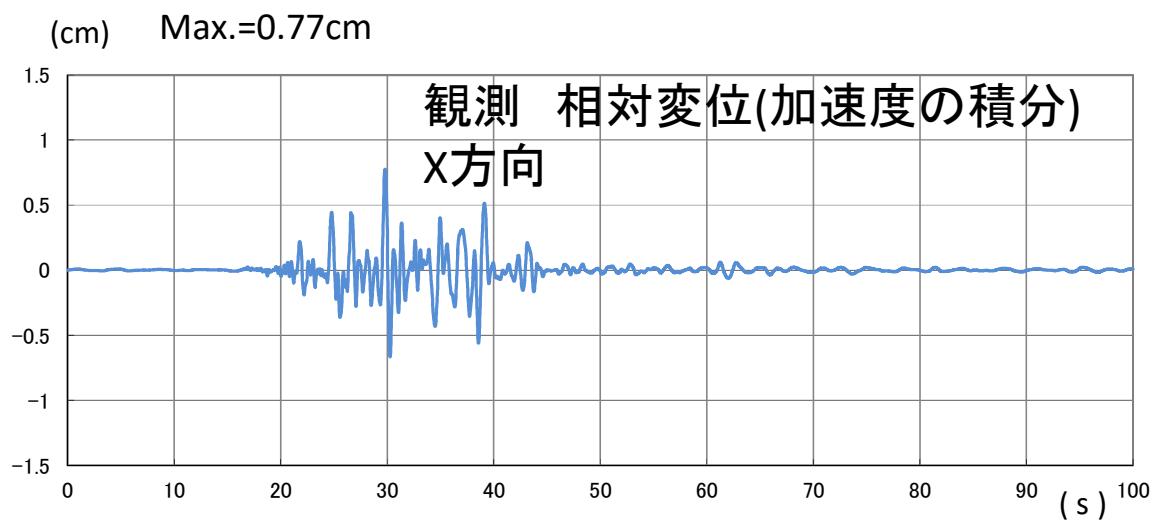


図 4-2-5 免震床の X 方向相対変位時刻歴の比較

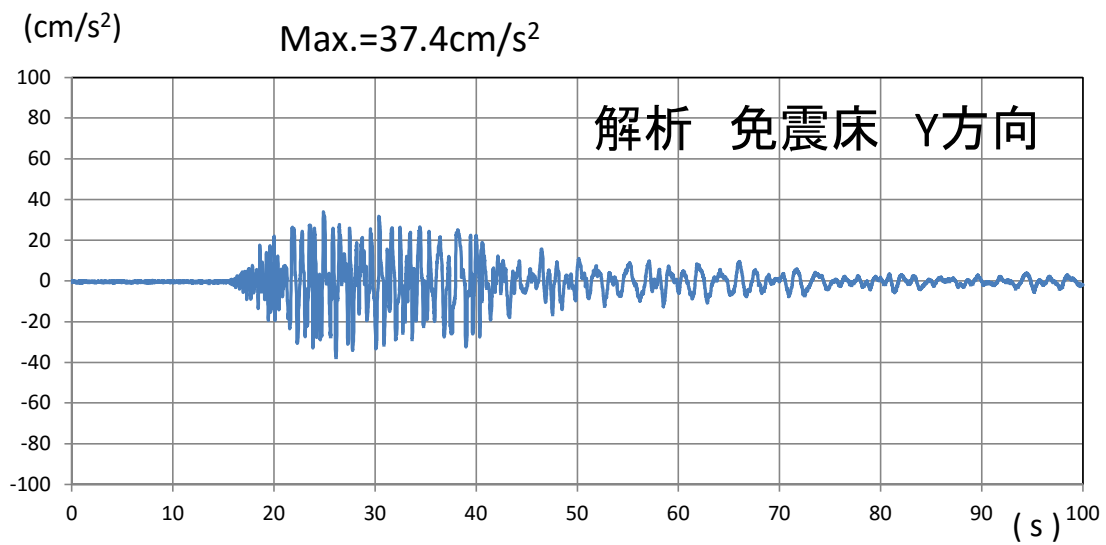
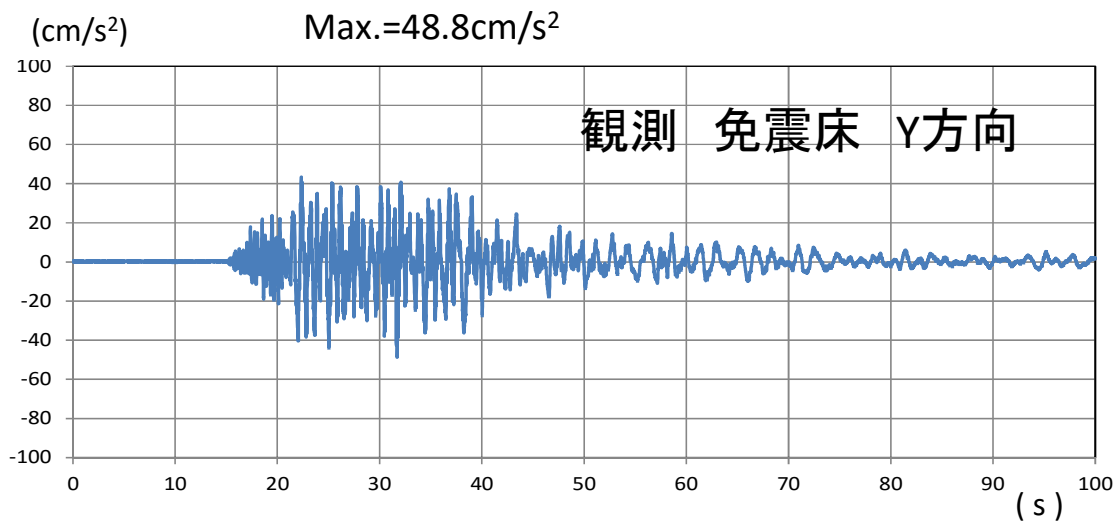


図 4-2-6 免震床 Y 方向加速度時刻歴の比較

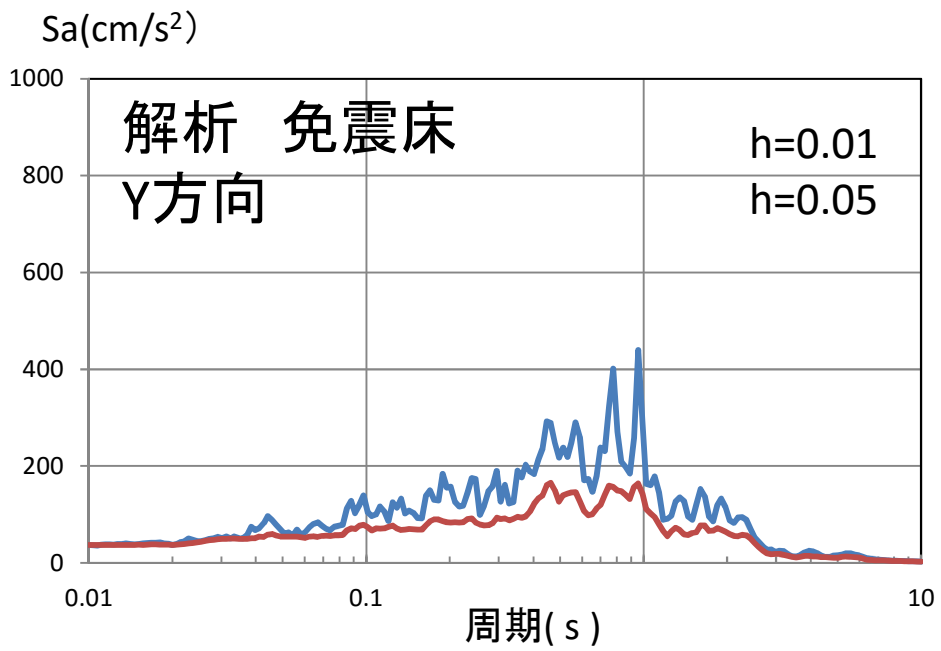
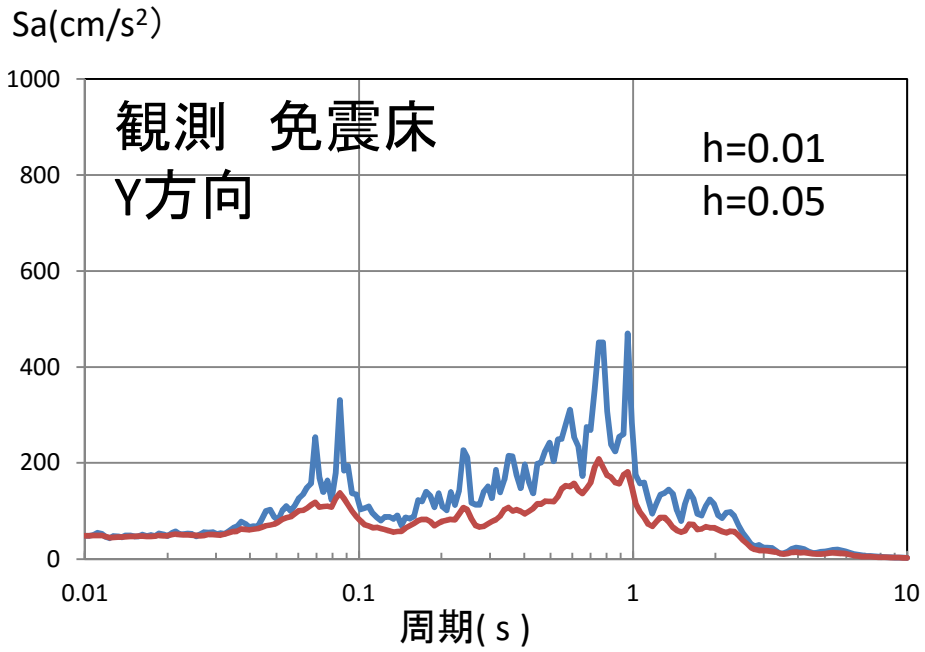


図 4-2-7 免震床 Y 方向加速度応答スペクトルの比較

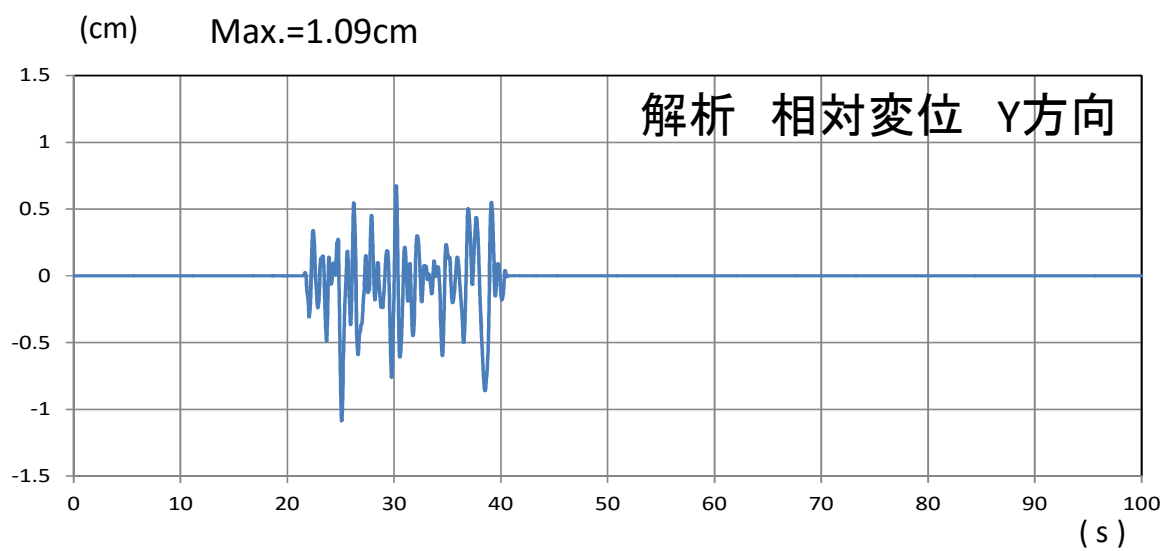
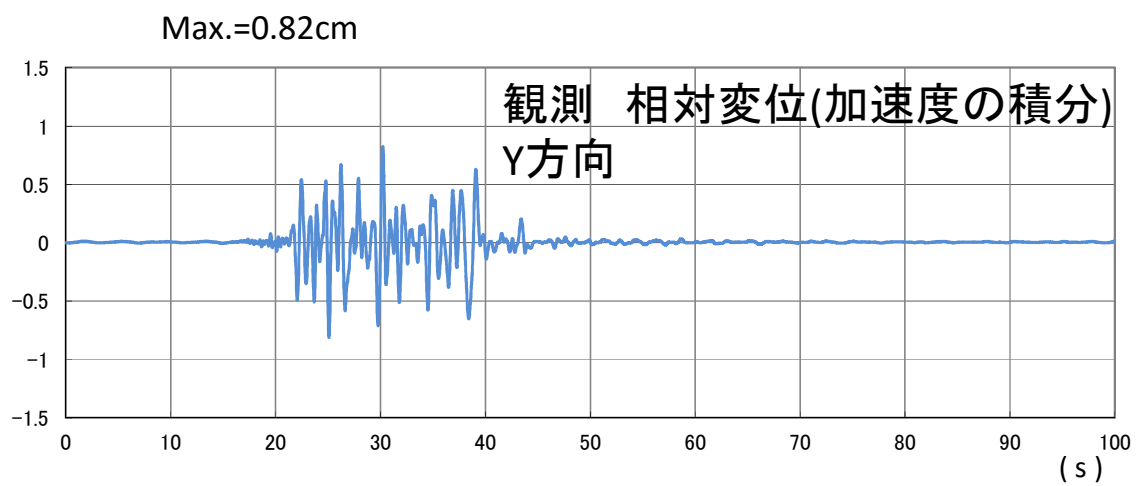


図 4-2-8 免震床の Y 方向相対変位時刻歴の比較

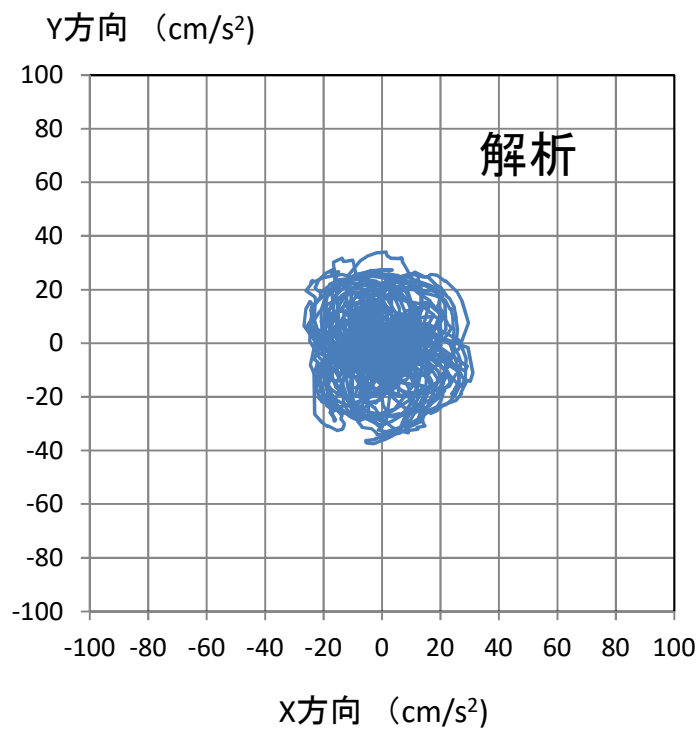
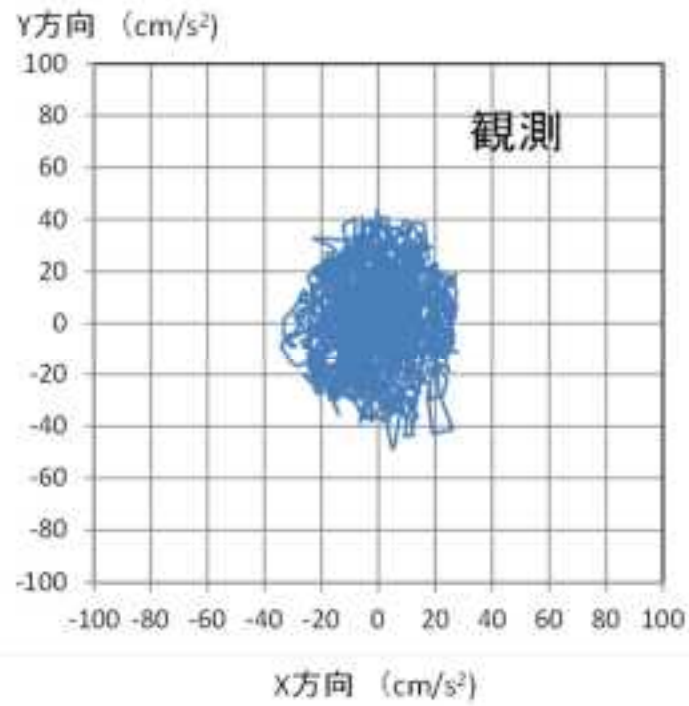
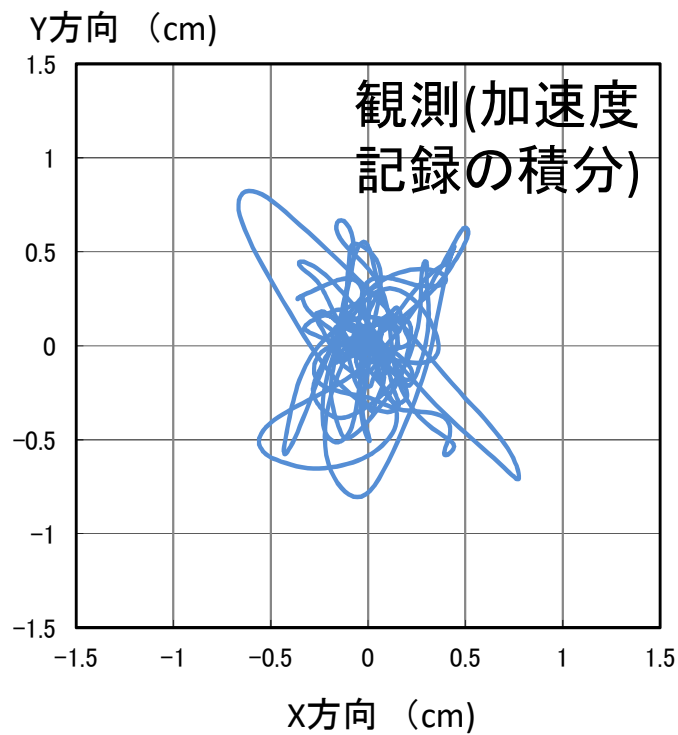


図 4-2-9 免震床の加速度オービットの比較



注) 変位は絶対加速度を積分して算出している。

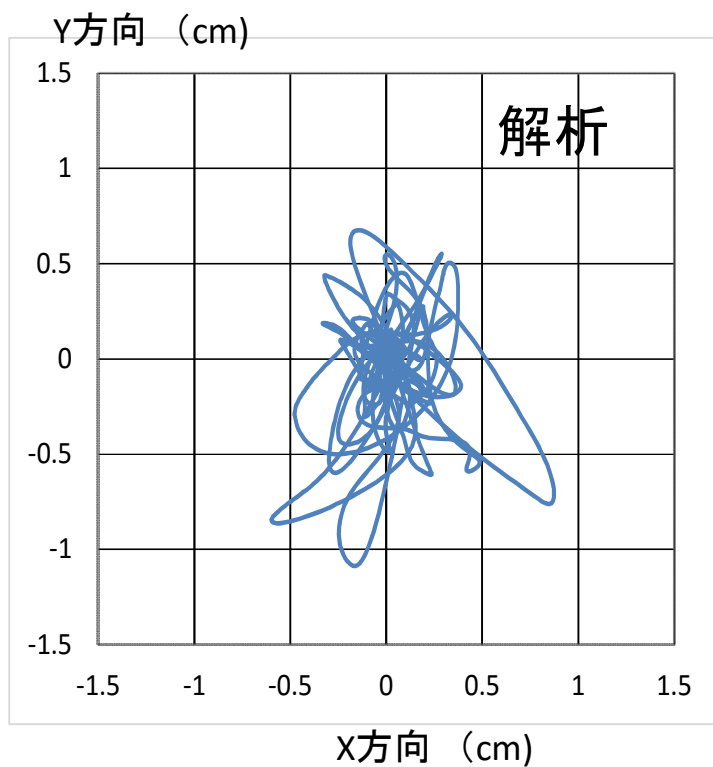


図 4-2-10 免震床の相対変位オービットの比較

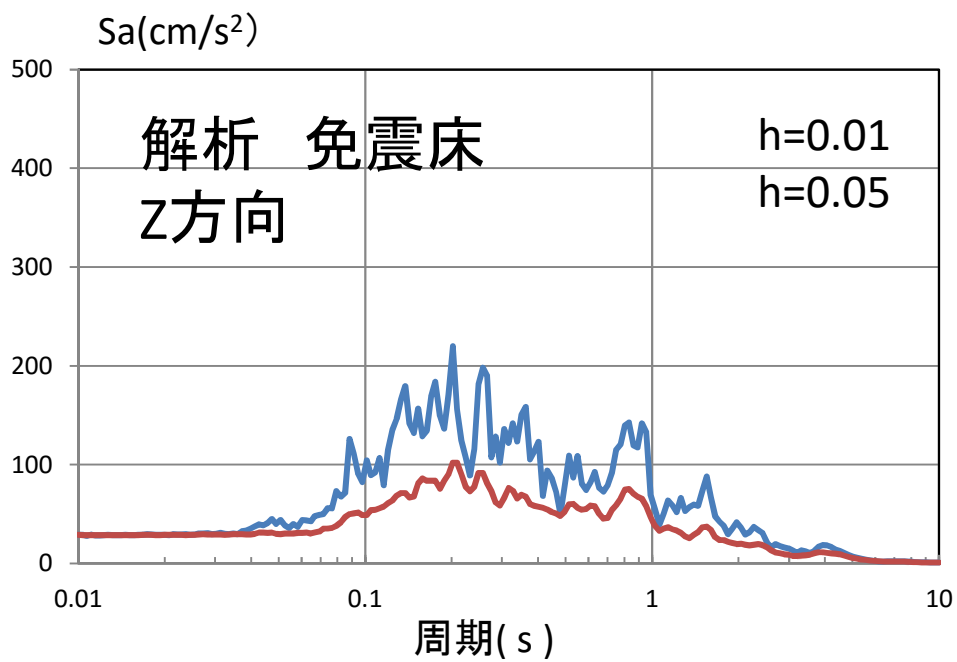
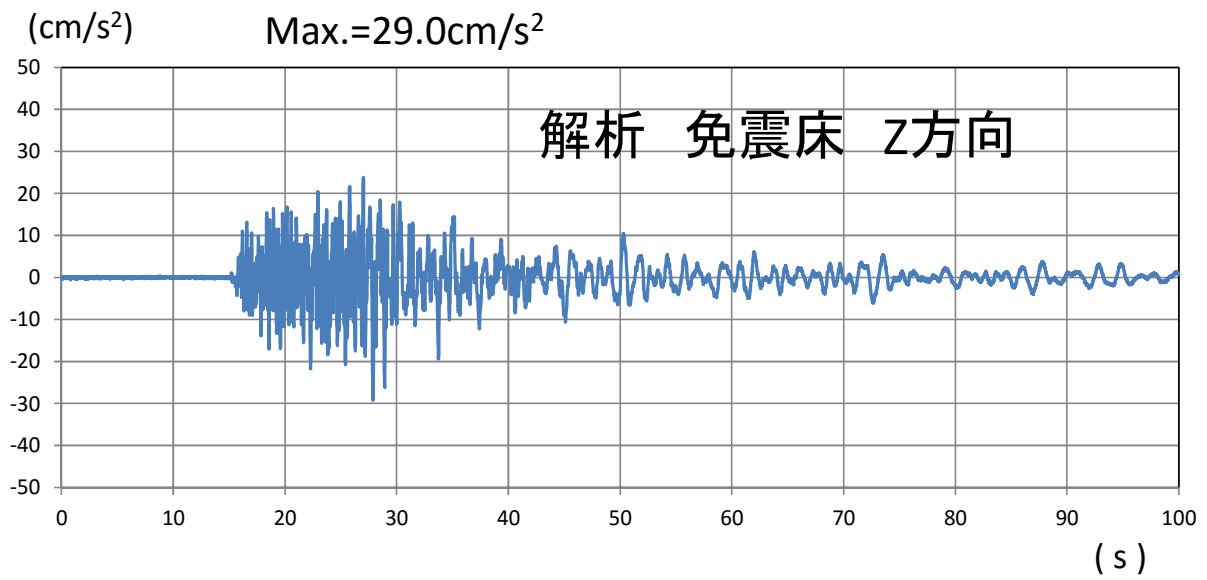


図 4-2-11 免震床 Z 方向加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(解析値)

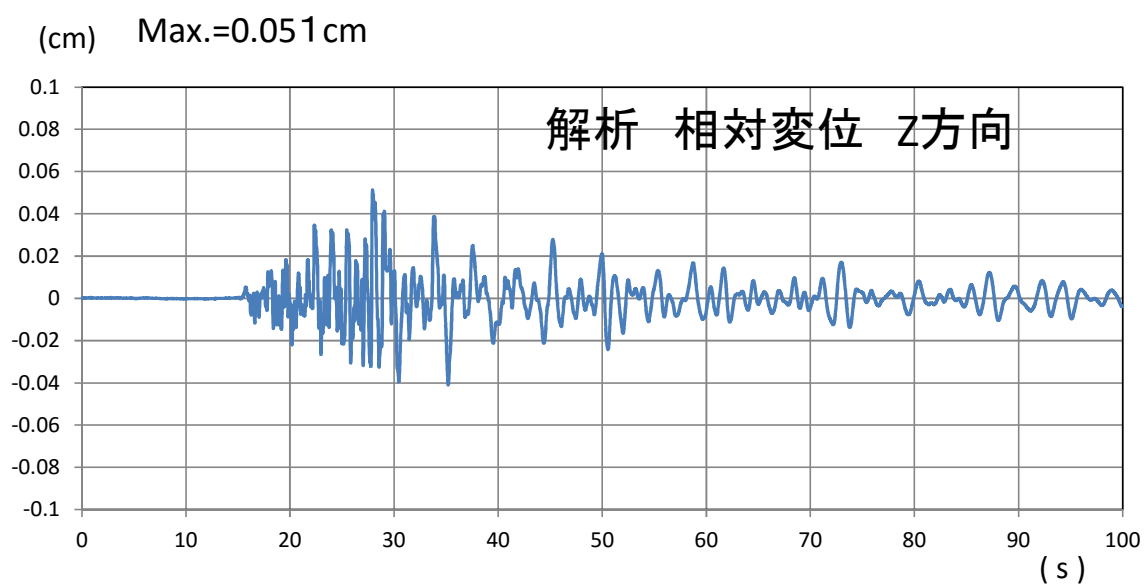


图 4-2-12 免震床 Z 方向相对变位时刻历(解析值)

4.3 建物-免震床の一体型振動解析モデルの作成

4.3.1 建物-免震床一体型解析モデル

本節では建物-免震床一体型振動解析モデルを作成して地震応答解析を行うために、建物の振動解析モデルを作成する。

一体型の振動解析モデルのイメージ図を図 4-3-1 に示す。建物は質点系にモデル化し、前節で作成した免振床解析モデルを組み込む。地盤の影響は水平方向(スウェイばね)の影響のみ考慮する。表 4-3-1 に解析モデルの諸元を示し、以下の各パラメータについて述べる。

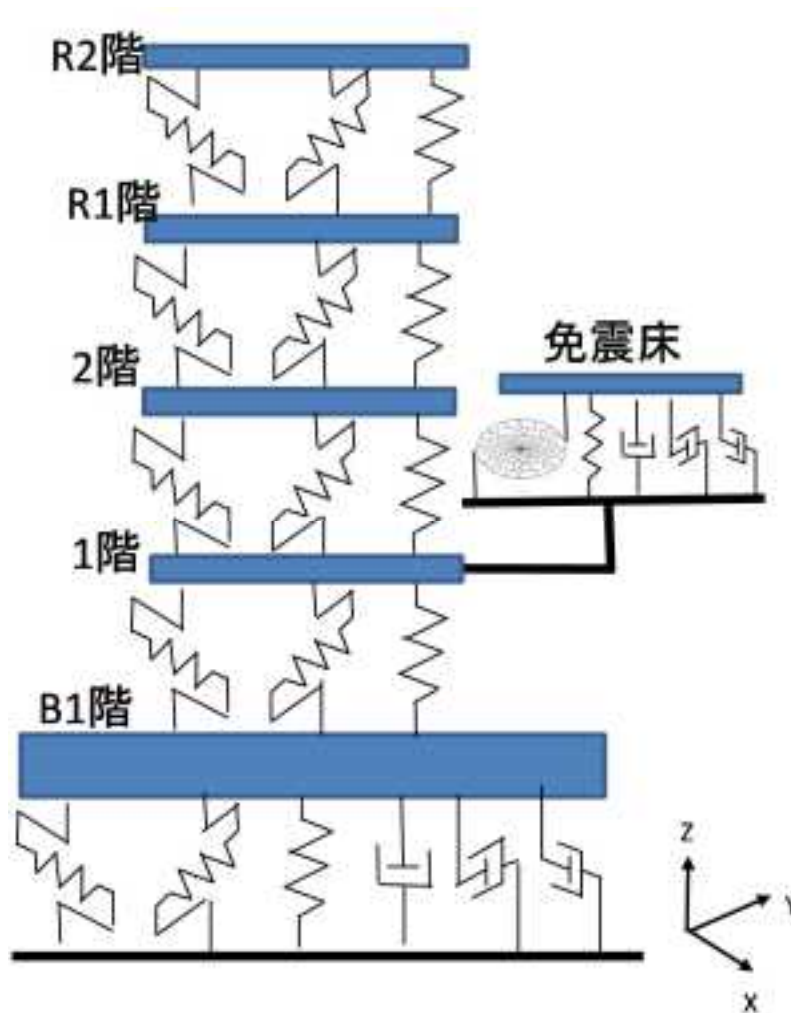


図 4-3-1 一体型振動解析モデルのイメージ

表 4-3-1 一体型解析モデルの諸元
(免震床部分は前節と同一なので省略する)

	建物重量(kN)
R2階	3134
R1階	6705.9
2階	7275.7
1階	8480.4
B1階	11899.5

	剛性(kN/m)		
	X方向	Y方向	Z方向
RF	1.9807×10^7	1.3716×10^7	1.5883×10^8
2F	1.1854×10^7	8.8468×10^6	1.1494×10^8
1F	1.8227×10^7	1.4168×10^7	1.6027×10^8
B1F	1.9764×10^7	1.6342×10^7	1.8361×10^8
基礎	4.6420×10^6	4.6420×10^6	9.2300×10^6

	減衰		
	X方向	Y方向	Z方向
RF			
2F		h=0.03	
1F			
B1F			
基礎	c=63662(kNs/m)	c=63662(kNs/m)	c=159160(kNs/m)

4.3.2 地盤ばねの設定

地盤の影響として水平方向モデルに水平ばね(スウェイばね)を考慮する。

ロッキング方向のばねは、本建物が横長の低層建物で杭基礎であることを考慮し、影響がスウェイ振動と比較して非常に小さいものと考えられるので無視した。

(1) 地盤モデルの設定

モデル化に用いた地盤柱状図にたいするボーリング孔の位置をも位置を図 4-3-2 に示す。原子力耐震構造センター近傍の A ボーリング孔(平成 4 年 2 月, 3 月実施)と、数十 m 離れた B ボーリング孔(平成 18 年 8 月実施)である。A ボーリング孔の柱状図(図 4-3-4)では、工学的基盤に相当する地層に達していないので、B ボーリング孔の柱状図(図 4-3-5)により、A ボーリング孔以深のデータを補うものとした。杭頭位置は GL-10.6m、工学的基盤位置を GL-36.25m とした。

地層の分割は図 4-3-4, 図 4-3-5 に示し、解析に用いる物性の諸元は表 4-3-2 に示す。各物性の評価方法は、表 4-3-2 で示している。

表 4-3-2 設定した地盤物性の諸元

基礎底からの深度(m)	層厚H(m)	種類	N値(平均)	中心深さH(m)	Vs'(m/s)	ポアソン比	Vp'(m/s)	ρ (t/m ³)
0~5.0	5	洪積粘性土	12.6	2.5	165.9	0.45	550.2	1.7
5~7.1	2.1	洪積砂質土	32	6.05	247.3	0.4	605.7	1.85
7.1~14.7	7.6	洪積粘性土	13.4	10.9	224.7	0.45	745.3	1.7
14.7~17.8	3.1	洪積砂質土	41.75	16.25	315.0	0.4	771.6	1.75
17.8~20.7	2.9	洪積粘性土	14.3	19.25	254.5	0.45	844.0	1.7
20.7~25.6	4.9	洪積粘性土	22.6	23.15	285.5	0.45	946.8	1.7
25.6以深	-	泥岩	50	30	498.6	0.4	1221.2	1.9

注)

・ Vs'(換算せん断波速度)は N 値から次式を用いて算出

$$Vs' = 68.79N^{0.171}H^{0.199}Y_g S_t$$

ここで、N は N 値、H は地表面からの深さ、 Y_g 、 S_t は地質と年代に応じた係数

・ ポアソン比、 ρ (単位体積質量)は土質から設定した仮定値



図 4-3-2 原子力耐震・構造センターの構造設計に用いられた地盤柱状図

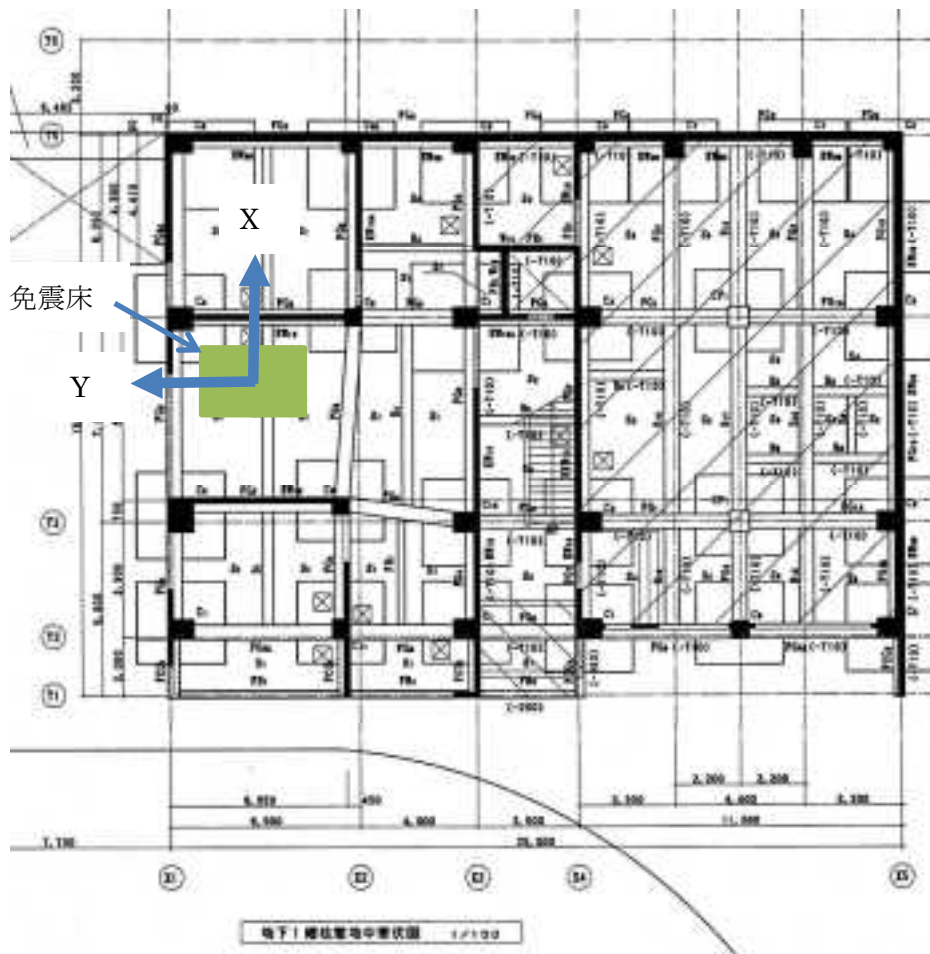


図 4-3-3 原子力耐震・構造センターの基礎形状

調査位置: 豊田県豊田町石巻

孔口標高: GL 26.4m

調査年月日: 平成4年 2月27日 ~ 平成4年 3月 4日

孔内水位: GL - 3.17m

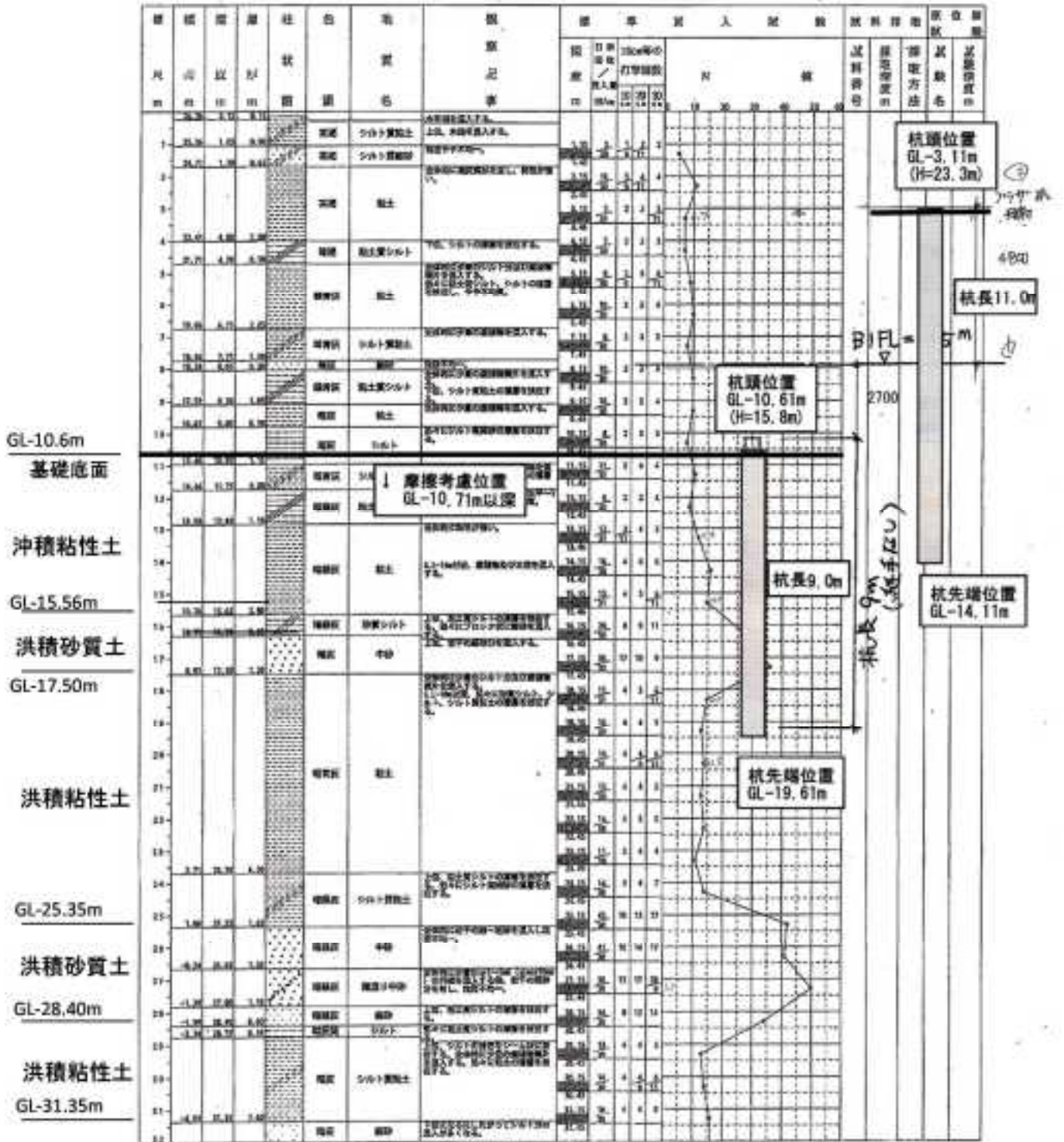


図 4-3-4 A ボーリング孔の柱状図

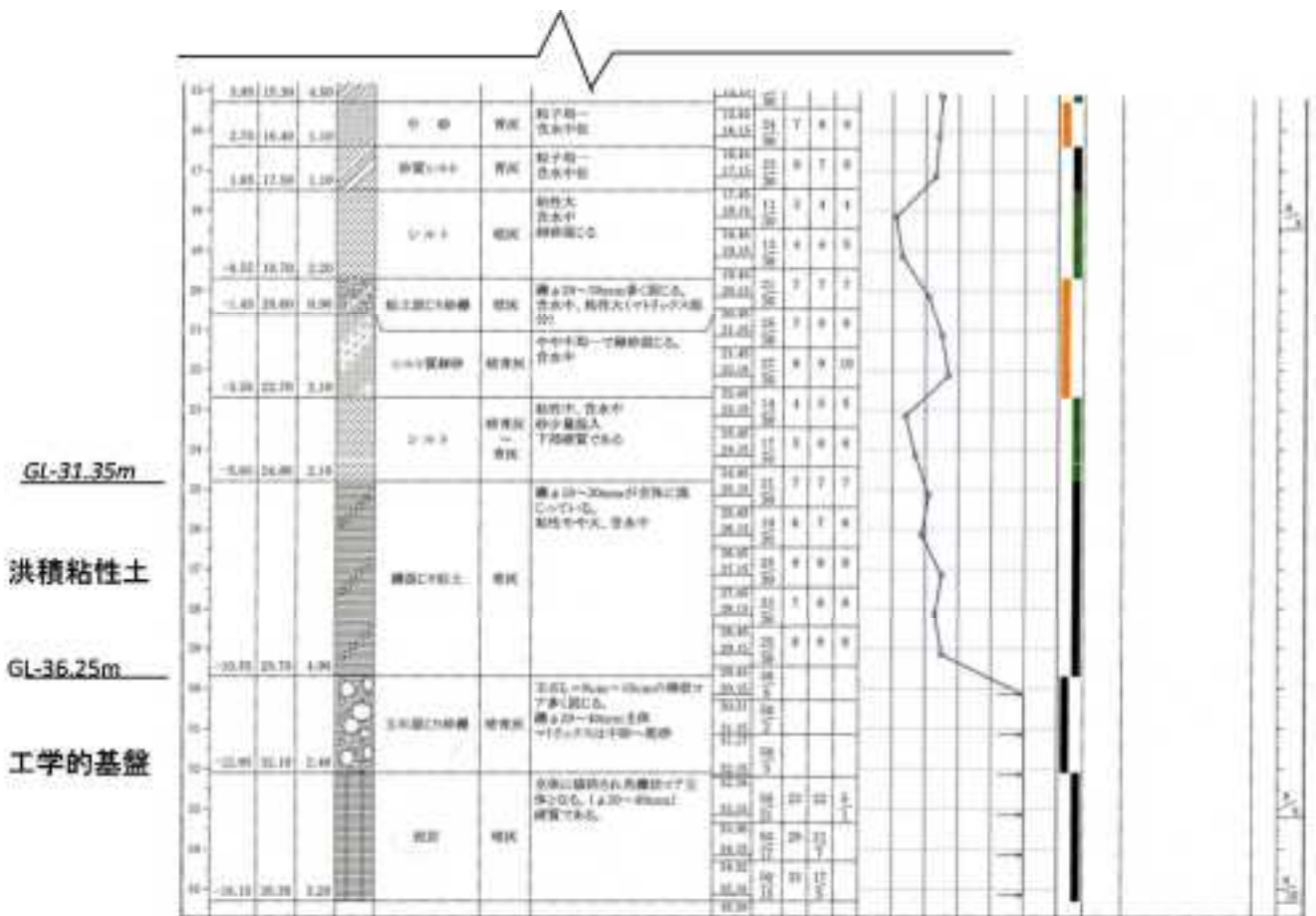


図 4-3-5 B ボーリング孔の柱状図

(2) 地盤ばねの算出

水平方向及び鉛直方向の地盤ばねの算出では、杭の効果、埋め込み効果を見捨てて地表面基礎として扱う。

地盤ばねの算出は、図 4-3-6 に示す地盤の軸対象回転体モデルを作成し、定常周波数解析を実施することにより算出する。

基礎版形状は図 4-3-3 に示すが、解析では面積が等しくなるような等価半径を設定する。また、地盤の要素分割は深さ方向で、1~2m 程度となるようにしている。

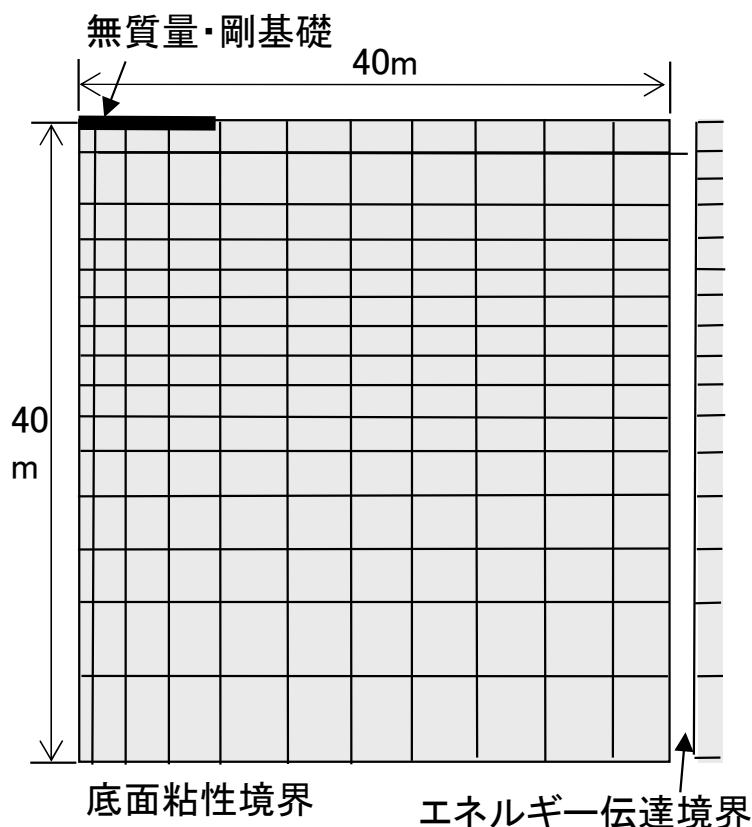


図 4-3-6 軸対象地盤モデル

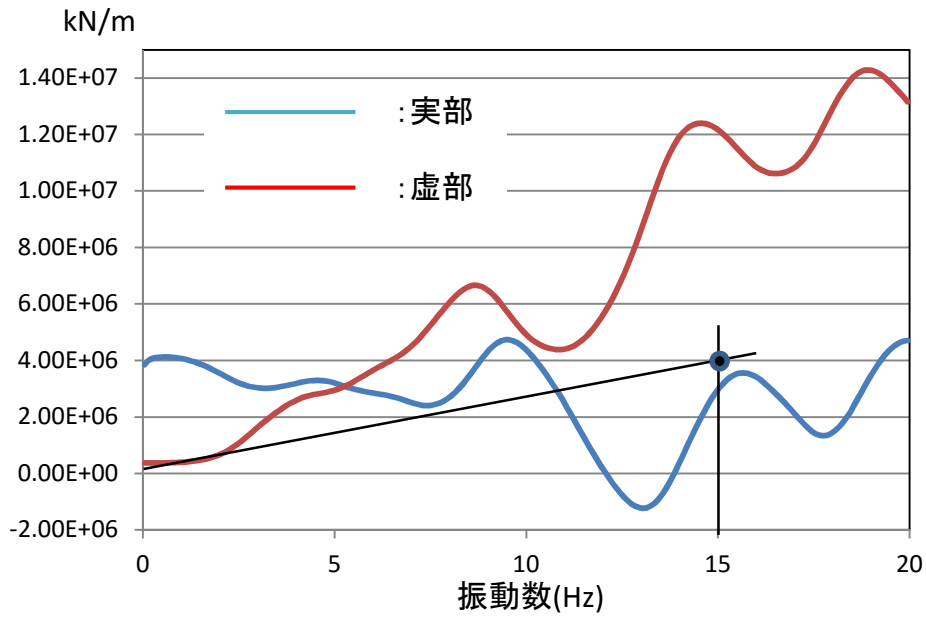
水平方向、鉛直方向の動的地盤ばねを図 4-3-7、図 4-3-8 に示す。基礎版は等価円形基礎として扱われているので水平方向は X,Y 方向で、地盤ばねは共通である。

地震応答解析に用いる地盤ばね定数と減衰係数は以下のように設定する。

地盤ばね定数：動的地盤ばねの実部のうち、静的な値

減衰係数：動的地盤ばねの虚部の勾配のうち、下限となる値

各数値の設定過程は図 4-3-7、図 4-3-8 中を示し、結果を表 4-3-3、表 4-3-4 に示す。



$$K_R(0\text{Hz}) = 4.127 \times 10^6 \text{ [kN/m]}$$

減衰係数は上記の勾配を参考として、

$$K_I(15\text{Hz}) = 4.0 \times 10^6$$

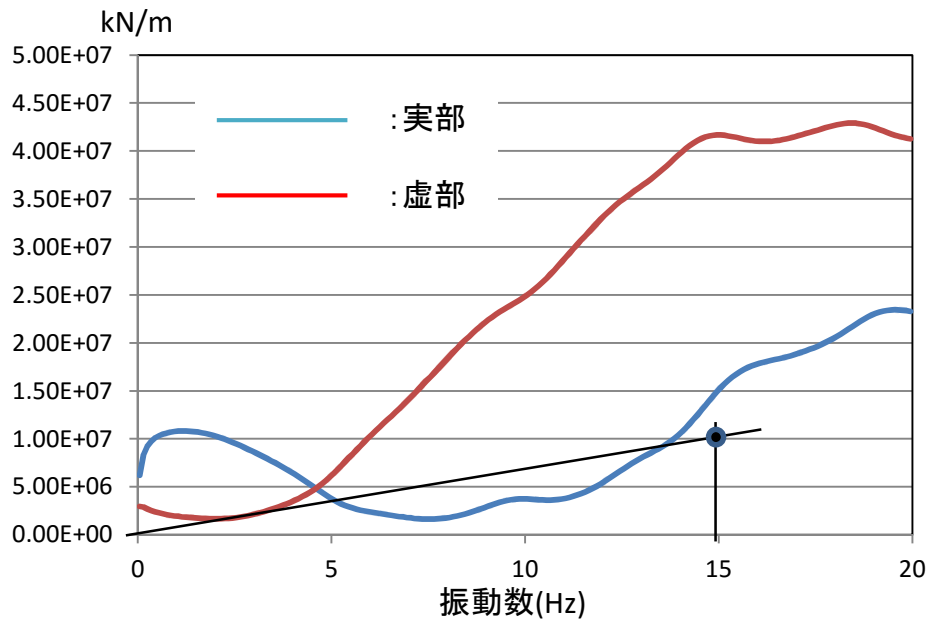
$$h' = \sin(0.5 \tan^{-1}(K_I(15\text{Hz}) / K_R(0\text{Hz}))) = \sin(0.5 \tan^{-1}(4.0 \times 10^6 / 4.13 \times 10^6)) = 0.375$$

$$C = K_I(15\text{Hz}) / \omega = 4.0 \times 10^6 / (2 \times \pi \times 15) = 42441.3 = 4.244 \times 10^4$$

図 4-3-7 水平方向の動的地盤ばね

表 4-3-3 時刻歴応答解析に用いる水平方向の地盤ばね定数と減衰係数

	ばね定数	減衰係数
	(kN/m)	(kNs/m)
水平方向	4.127×10^6	4.244×10^4



$$K_R(0\text{Hz})=1.082 \times 10^7 \text{ kN/m}$$

減衰係数は上記の勾配を参考として

$$K_I(15\text{Hz})=1.0 \times 10^7$$

$$h'=\sin(0.5 \tan^{-1}(K_I(7.7\text{Hz})/K_R(0\text{Hz}))=\sin(0.5 \tan^{-1}(1.0 \times 10^7/1.08 \times 10^7))=0.364$$

$$c=K_I(15\text{Hz})/\omega=1.0 \times 10^7/(2 \times \pi \times 15) = 106103.3=1.061 \times 10^5$$

図 4-3-8 鉛直方向の動的地盤ばね

表 4-3-4 時刻歴応答解析に用いる鉛直方向の地盤ばね定数と減衰係数

	ばね定数	減衰係数
	(kN/m)	(kNs/m)
鉛直方向	1.082×10^7	1.061×10^4

4.3.3 建物のモデル化

新潟工科大学原子力・耐震構造研究センターの3次元建物モデルを作成する。

重量と剛性は昨年度実施した結果を用いる。建物重量(表 4-3-1)は、新潟工科大学原子力・耐震構造研究センターの構造計算書より引用している。水平方向剛性は、同計算書の層間変形角検討時の層せん断力と層間変形の関係から算出している。鉛直方向は柱、壁などの鉛直方向部材の軸断面積に基づき算出している。

また、解析で用いる X, Y 方向は免震床の X, Y 方向とするので、建物の方向では、図 4-3-3 に示すように X 方向は建物の短辺方向、Y 方向は建物の長辺方向に相当している。建物剛性を一覧として表 4-3-5 に示す。また、建物モデルは弾性として扱う。

表 4-3-5 時刻歴応答解析に用いる地盤ばね定数と減衰係数

	建物剛性(kN/m)		
	X方向	Y方向	Z方向
RF	1.9807×10^7	1.3716×10^7	1.5883×10^8
2F	1.1854×10^7	8.8468×10^6	1.1494×10^8
1F	1.8227×10^7	1.4168×10^7	1.6027×10^8
B1F	1.9764×10^7	1.6342×10^7	1.8361×10^8

4.3.4 建物の固有周期

地盤を考慮した建物の振動解析モデルを用いて固有値解析を実施し、固有周期を算出する。固有周期を表 4-3-7 に示す。Y 方向の 1 次周期は 0.204s、X 方向の 1 次周期は 0.198s、Z 方向の 1 次周期は 0.131s である。

表 4-3-7 建物の固有周期

次数	周期(s)	備考
1次	0.204	Y方向1次
2次	0.198	X方向1次
3次	0.131	Z方向1次
4次	0.07	Y方向2次
5次	0.062	X方向2次
6次	0.039	Y方向3次
7次	0.035	X方向3次

4.4 一体型モデルによる地震応答解析(2004年新潟県中越地震)

建物-免震床一体型モデルの地震応答解析を実施する。

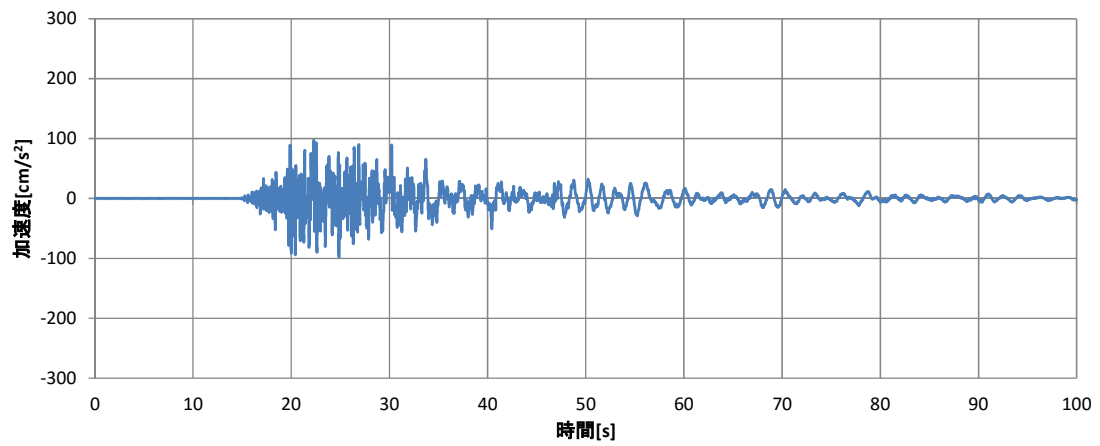
入力地震動は2004年中越地震(本震)で、k-net 柏崎(NIG018)で観測された地表面地震動を用いる。地震動はNS方向、EW方向、UD方向の3成分である。図4-3-2に示す建物の向きを考慮して、NS成分をX方向に、EW成分をY方向に、UD成分をZ方向に同時入力することとする。

検討は、時刻歴波形と加速度地震応答スペクトルを用いて行うが、応答スペクトルの減衰定数は $h=0.01$ 、 0.05 の2種類とする。

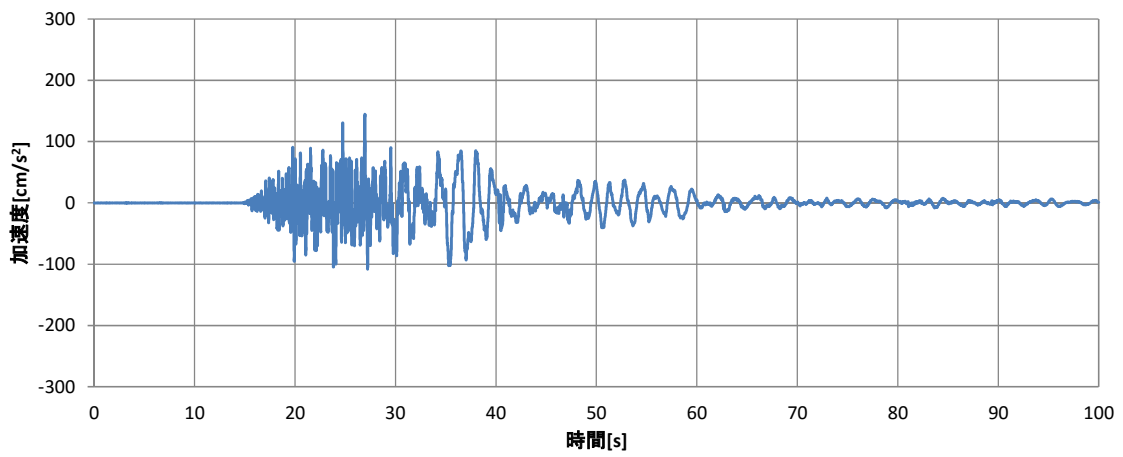
4.4.1 入力地震動

k-net 柏崎(NIG018)で観測された2004年新潟県中越地震の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図4-4-1～図4-4-2に示す。

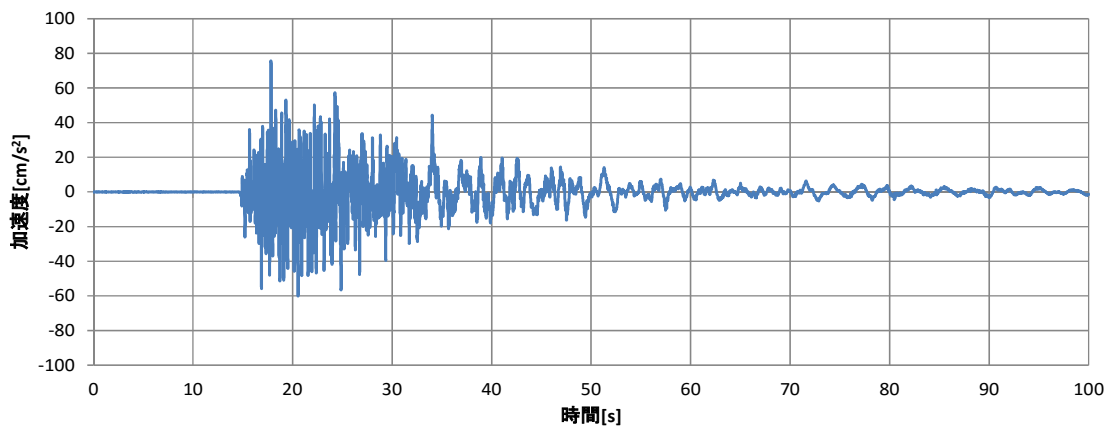
水平方向では、周期0.5s以下の比較的短周期と周期1～2s付近の成分の卓越が見られる。鉛直方向では、周期1.0s以下の成分の卓越が見られる。



NS 方向 加速度時刻歴



EW 方向 加速度時刻歴

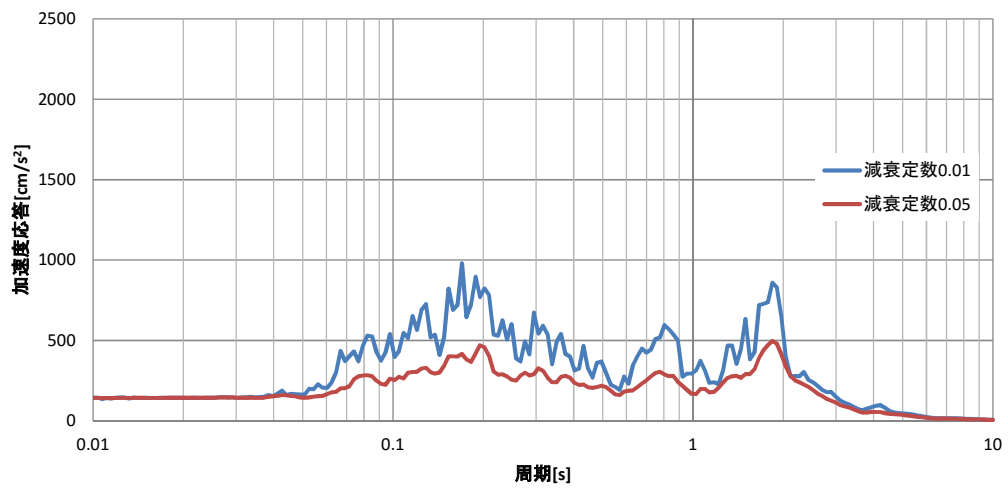


UD 方向 加速度時刻歴

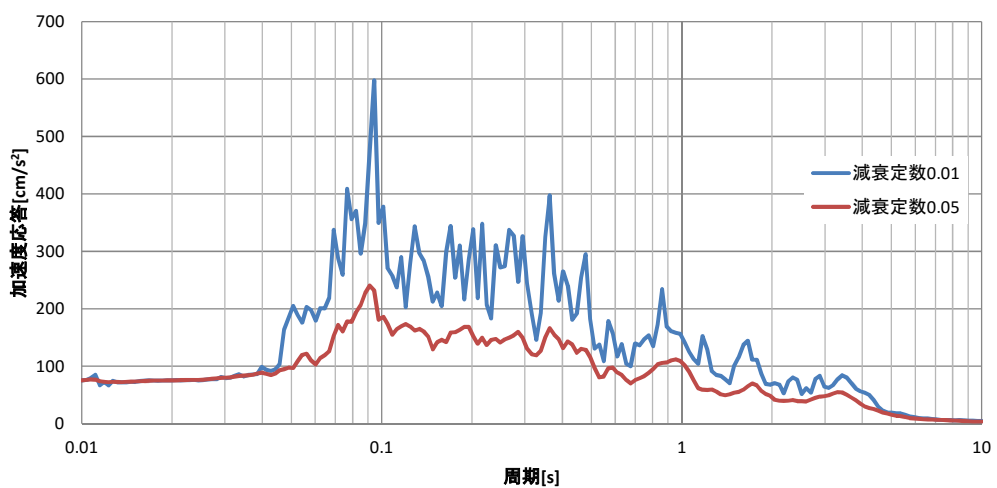
図 4-4-1 2004 年中越地震での観測波((NIG018))の加速度時刻歴



NS 方向 加速度応答スペクトル



EW 方向 加速度応答スペクトル



UD 方向 加速度応答スペクトル

図 4-4-2 2004 年中越地震での観測波((NIG018))の加速度応答スペクトル

4.4.2 免震効果の確認

一体型解析モデルの解析結果から免震床の免震効果は、固定床(B1F)と免震床の応答結果を比較することにより検討する。

また、一体型解析モデルの固定床(B1F)の地震応答は、免震床部分を設けない建物のみのモデルのB1Fの応答結果とほぼ同一であることを、昨年度の解析結果より確認している。

掲載した表、図を整理して以下に示す。

表 4-4-1 2004年中越地震の地震動による最大応答値(×1.0入力)

図 4-4-3 中越地震 X 方向 B1F 固定床の加速度時刻歴

図 4-4-4 中越地震 X 方向 免震床の加速度時刻歴

図 4-4-5 中越地震 X 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-4-6 中越地震 X 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-4-7 中越地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

図 4-4-8 中越地震 Y 方向 免震床 加速度時刻歴

図 4-4-9 中越地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-4-10 中越地震 Y 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-4-11 中越地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

図 4-4-12 中越地震 Z 方向 免震床 加速度時刻歴

図 4-4-13 中越地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-4-14 中越地震 Z 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-4-15 中越地震 X 方向 相対変位時刻歴 (免震床一固定床)

図 4-4-16 中越地震 Y 方向 相対変位時刻歴 (免震床一固定床)

図 4-4-17 中越地震 Z 方向 相対変位時刻歴 (免震床一固定床)

(1) 応答加速度の比較

1) 水平方向 (X、Y 方向)

X 方向に関しては、表 4-4-1 の最大加速度の一覧より、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 1/5 程度となっている。加速度時刻歴においては、固定床の時刻歴で振幅の大きい 20~30s 間の振幅が大きく低減されている。加速度応答スペクトルにおいては、固定床(B1F)に建物の 1 次固有周期である 0.2s 付近に大きなピークが見られるが、免震床では大きく低減されている。

Y 方向に関しては、傾向は X 方向と同様であるが、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 1/3 程度と X 方向より小さくなっている。これは、免震床の最大値が加速度時刻歴の 30~40s 間で発生しており、この間は周期 1~2s 程度の成分の影響を受けているためと考えられる。また、建物の 1 次固有周期である 0.2s 付近の成分は、X 方向と同様に低減されている。

2) 鉛直方向 (Z 方向)

最大加速度の一覧より、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 70%程度となっている。加速度時刻歴においても、加速度時刻歴では、固定床(B1F)で振幅の大きい 15~25s 間の振幅が低減されて

いる。加速度応答スペクトルにおいては、固定床(B1F)で見られる周期 0.3s 程度以下の比較的短周期成分が低減されているが、低減率は、水平方向ほど大きくはない。これは、水平方向と鉛直方向の免震機構のメカニズムに起因するものと考えられる。

(2) 層間変形の検討

免震床と固定床の相対変位について検討する。

1) 水平方向 (X、Y 方向)

表 4-4-1 の最大加速度の一覧より、最大相対変位は X 方向で 5.5cm、Y 方向で 12cm 程度であり、Y 方向で 2 倍程度となっている。これは最大加速度と同様の傾向である。本免震機構は水平方向においては、すべりが生じるに従って、振動周期は長くなるものと考えられるが、時刻歴波形を見ると、かなり長周期となって振動していることがわかる。これは加速度波形でも見ることができる。

2) 鉛直方向 (Z 方向)

最大加速度の一覧より、最大相対変位は 0.16cm%程度であり、水平方向比較すると小さくなっている。

表 4-4-1 2004 年中越地震の地震動による最大応答値(×1.0 入力)

	最大加速度(cm/s ²)			最大相対変位(cm)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
入力地震動	97.9	144.4	75.6	—	—	—
固定床	207.0	241.5	78.1	—	—	—
免震床	40.7	83.8	56.8	5.45	12.2	0.159

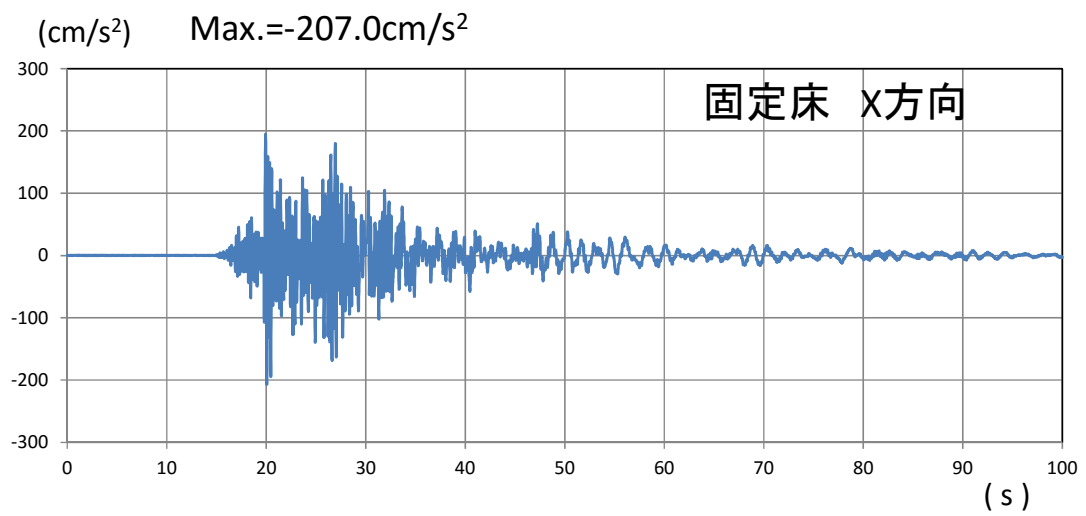


図 4-4-3 中越地震 X 方向 B1F 固定床の加速度時刻歴

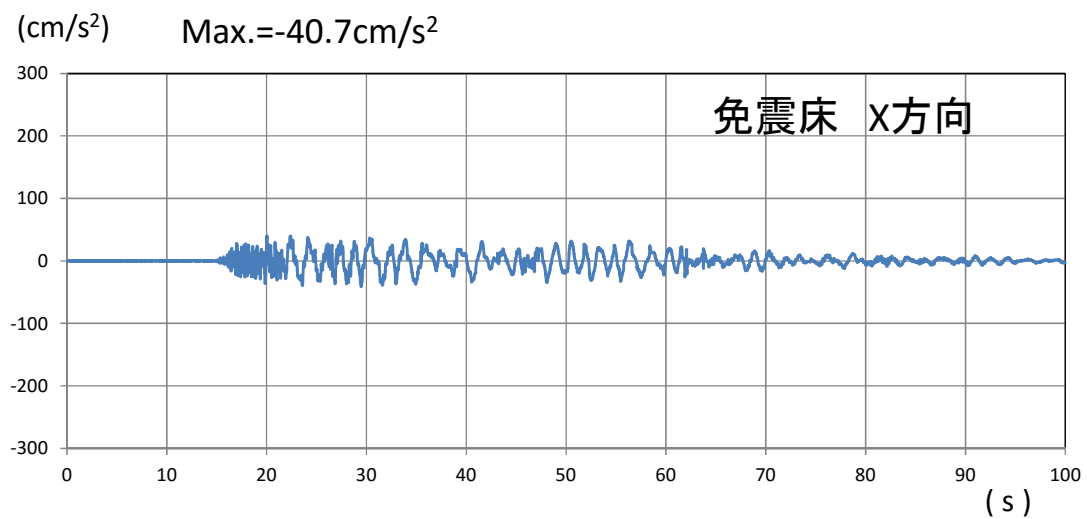


図 4-4-4 中越地震 X 方向 免震床の加速度時刻歴

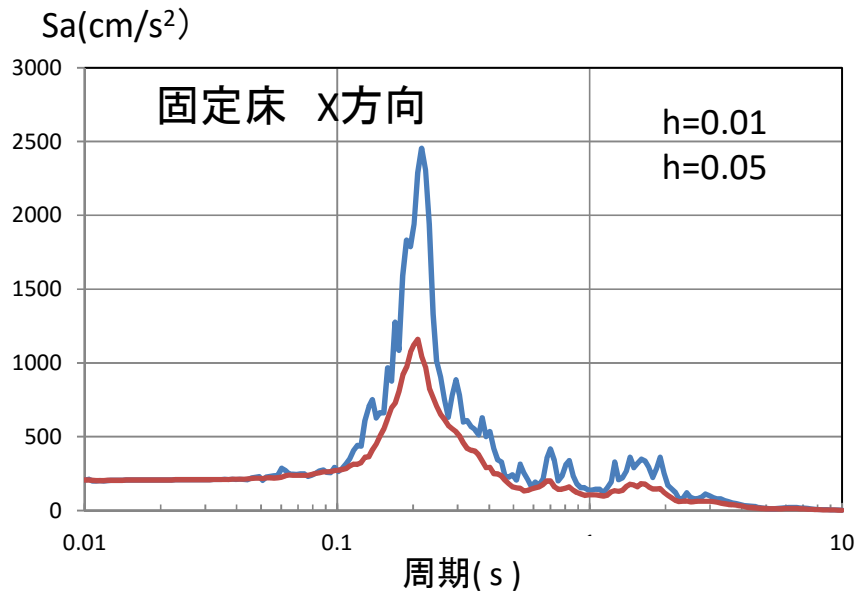


図 4-4-5 中越地震 X 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

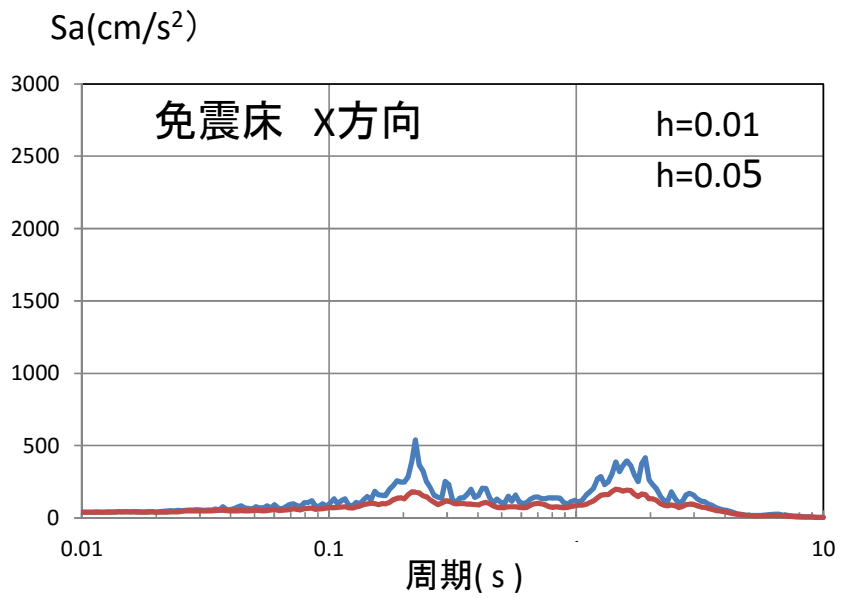


図 4-4-6 中越地震 X 方向 免震床 加速度応答スペクトル

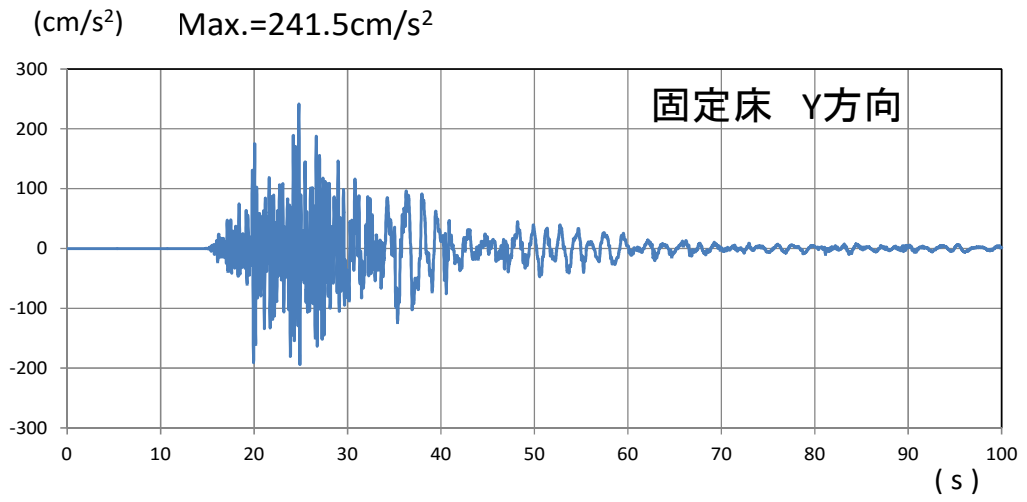


图 4-4-7 中越地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

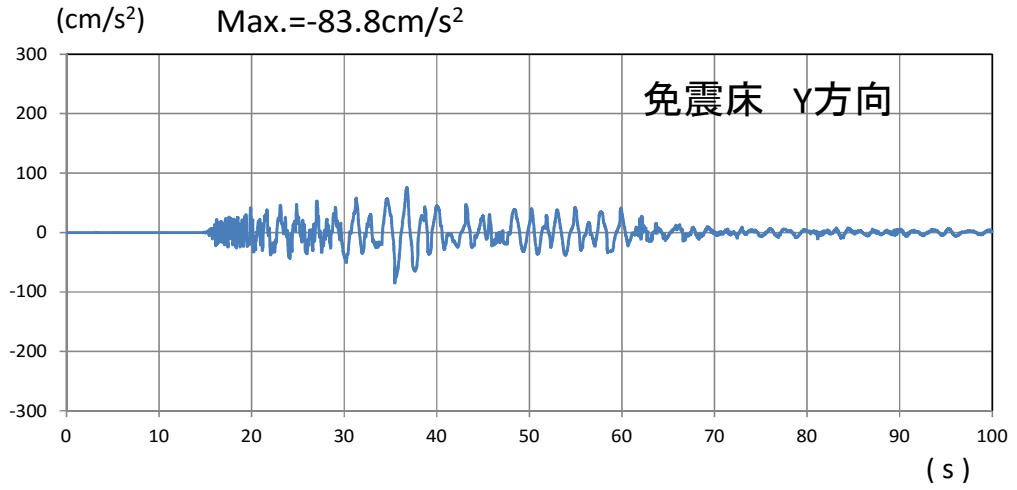


图 4-4-8 中越地震 Y 方向 免震床 加速度時刻歴

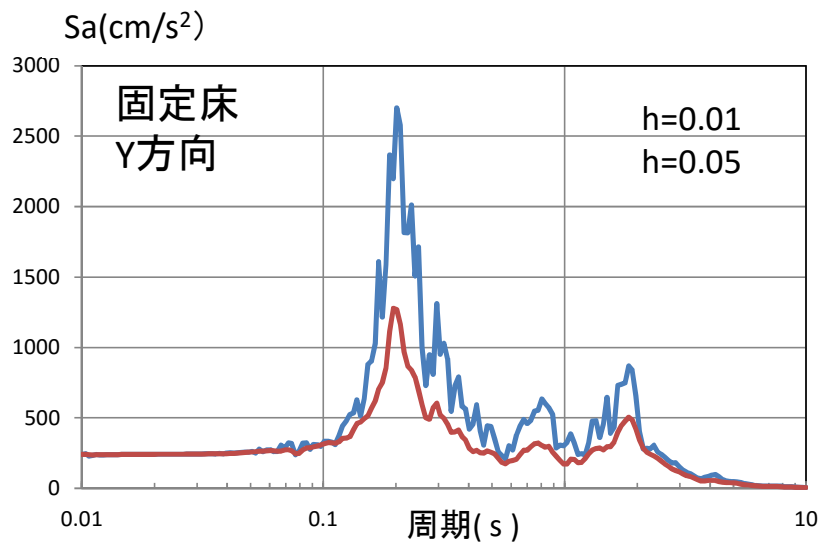


図 4-4-9 中越地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

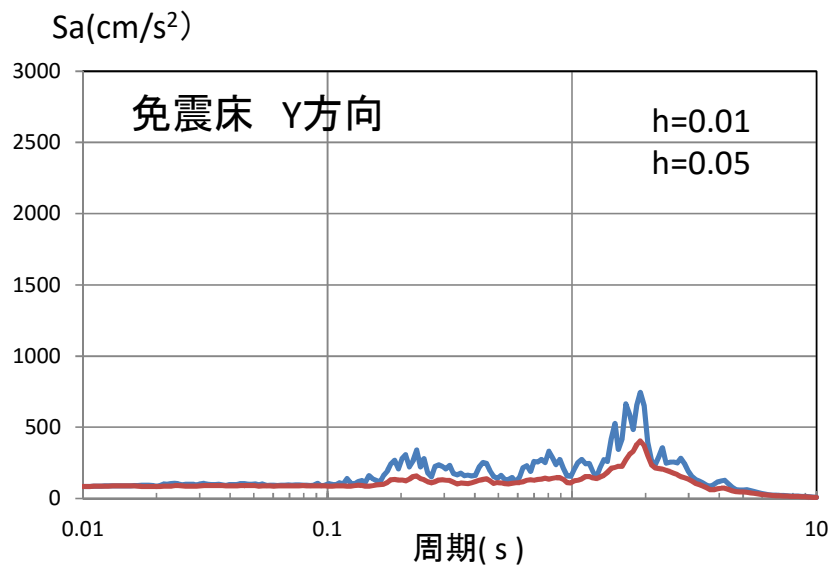


図 4-4-10 中越地震 Y 方向 免震床 加速度応答スペクトル

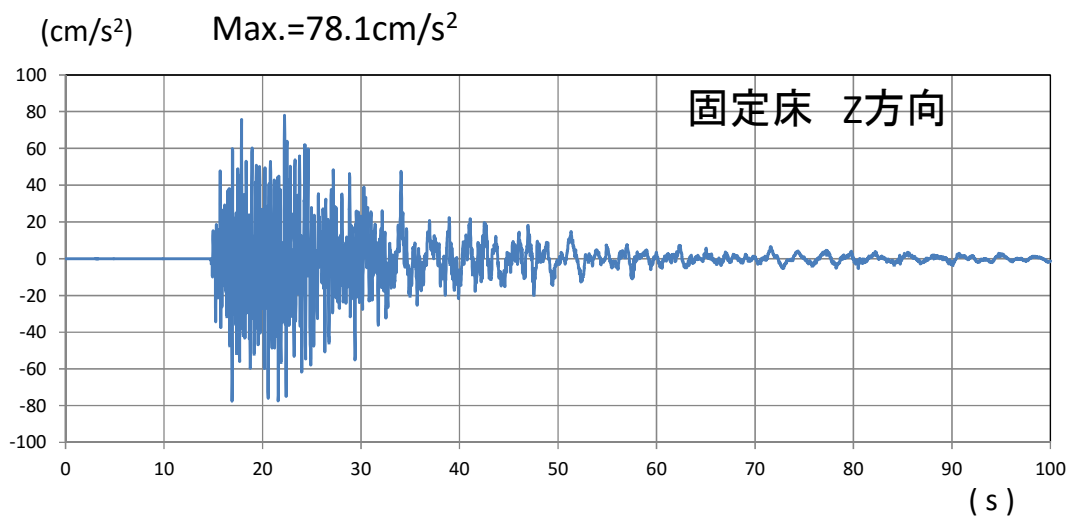


图 4-4-11 中越地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

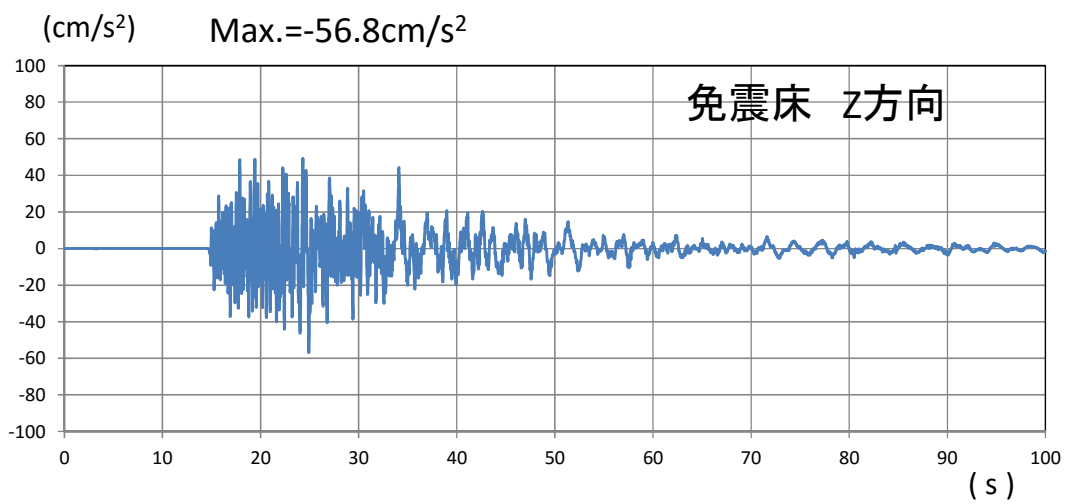


图 4-4-12 中越地震 Z 方向 免震床 加速度時刻歴

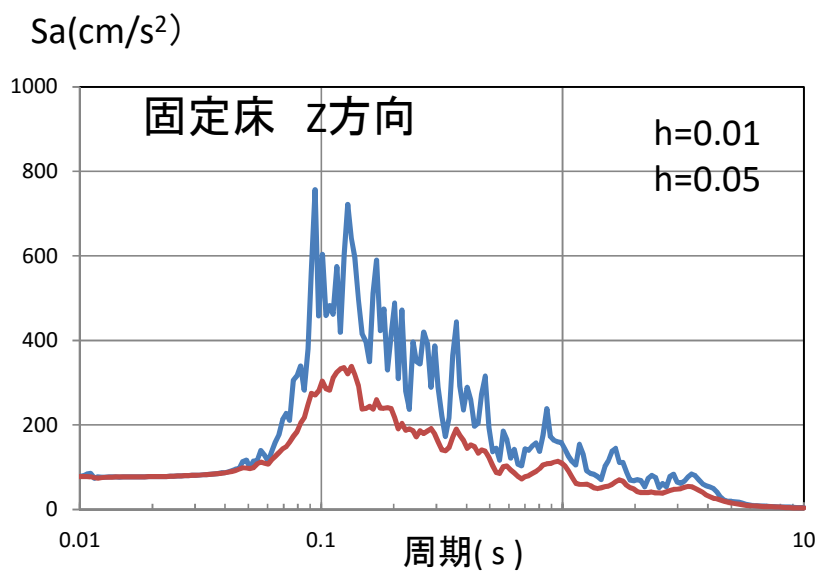


図 4-4-13 中越地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

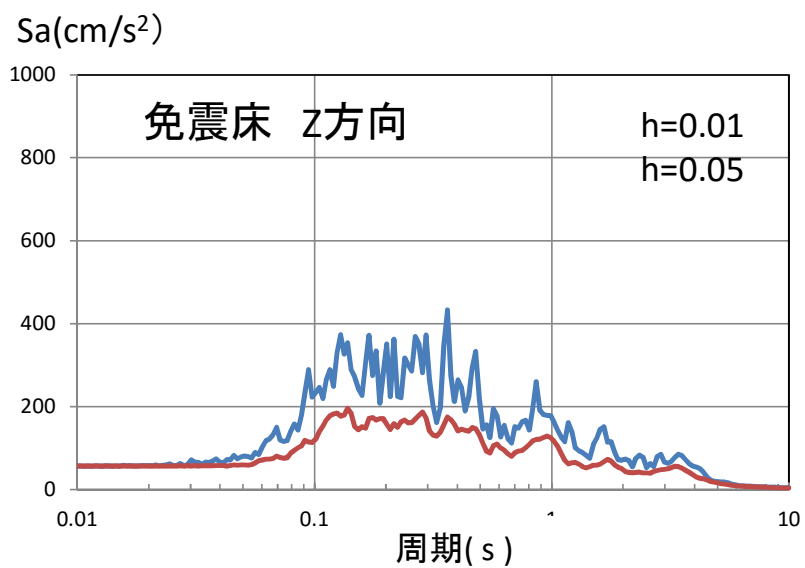


図 4-4-14 中越地震 Z 方向 免震床 加速度応答スペクトル

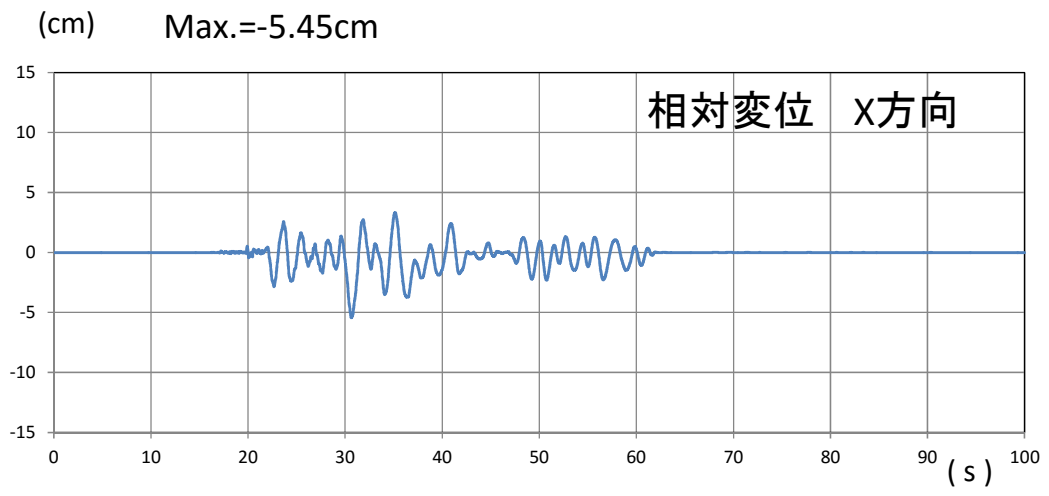


图 4-4-15 中越地震 X 方向 相对变位时刻历 (免震床一固定床)

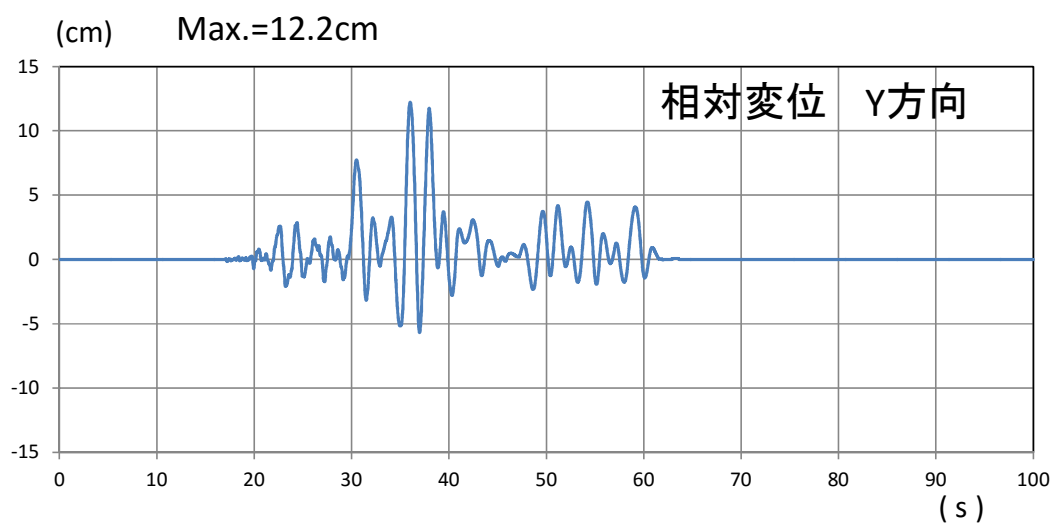


图 4-4-16 中越地震 Y 方向 相对变位时刻历 (免震床一固定床)

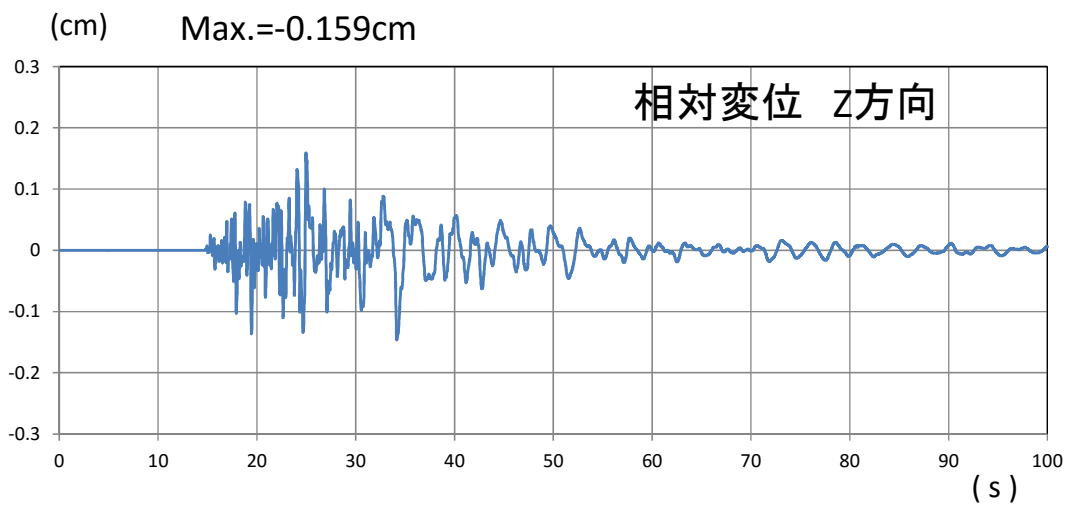


图 4-4-17 中越地震 Y 方向 相对变位时刻历 (免震床一固定床)

4.5 一体型モデルによる地震応答解析(2007年新潟県中越沖地震)

建物-免震床一体型モデルの地震応答解析を実施する。

入力地震動は2007年新潟県中越沖地震(本震)で、k-net 柏崎(NIG018)で観測された地表面地震動を用いて、一体型モデルの地震応答解析を実施する。

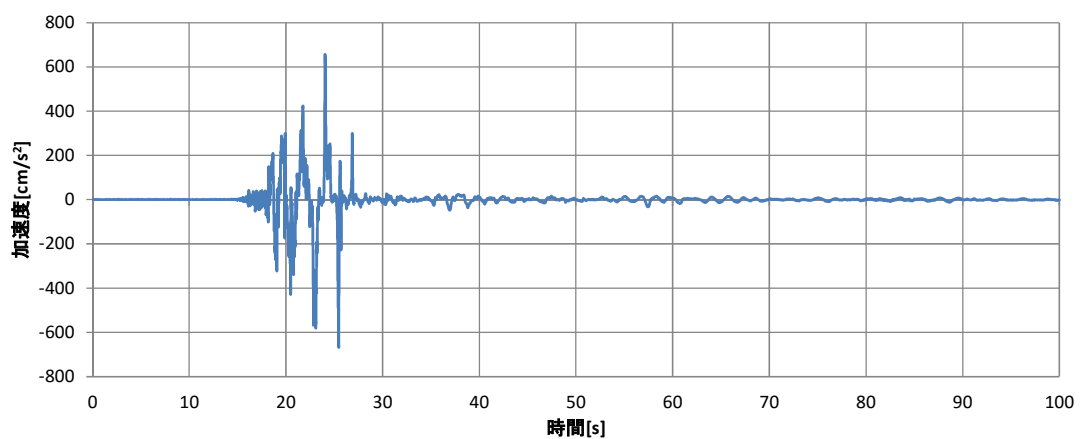
2004年中越地震と同様にNS成分をX方向に、EW成分をY方向に、UD成分をZ方向に同時入力する。

4.5.1 入力地震動

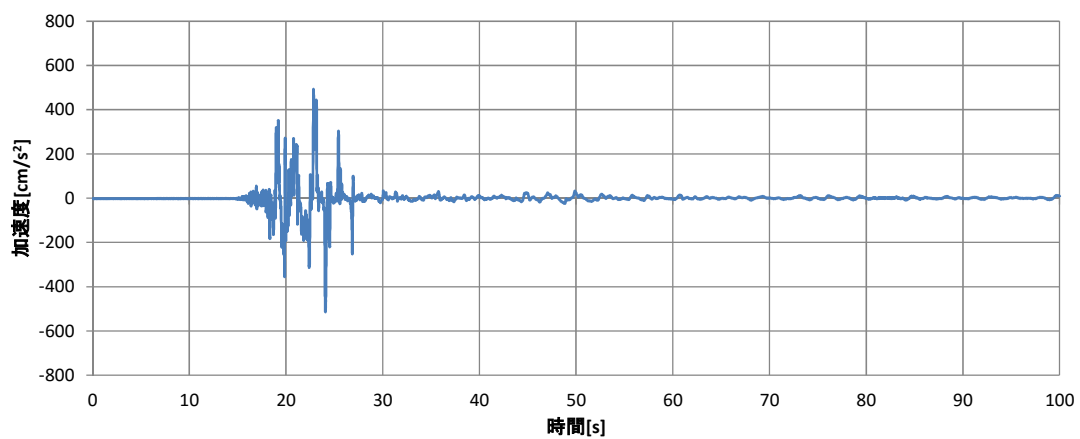
k-net 柏崎(NIG018)で観測された2007年新潟県中越沖地震の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図4-5-1～図4-5-2に示す。

水平方向では、特別の卓越周期を持たず、周期0.1s～2.0s付近まで広範囲の成分が増幅されている。鉛直方向では、周期0.5s以下の比較的短周期の成分の卓越が見られる。

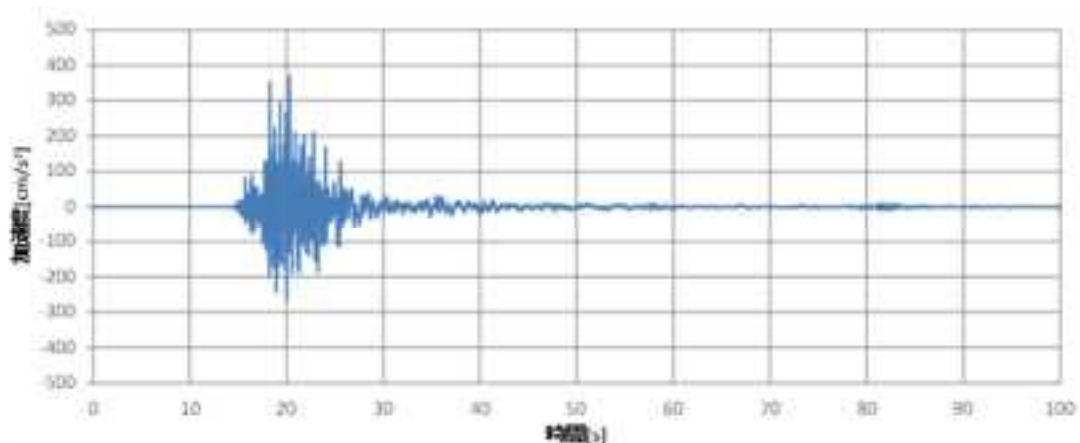
図4-5-1～図4-5-2には、観測記録を等倍で示すが、地震応答解析では、NS成分に、EW成分、UD成分の各振幅を1/3倍して入力する。



NS 方向 加速度時刻歴

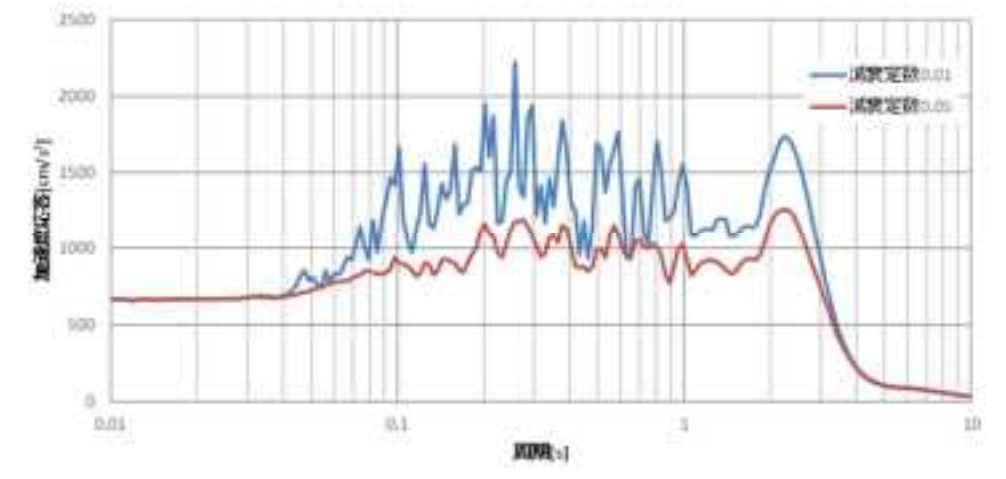


EW 方向 加速度時刻歴

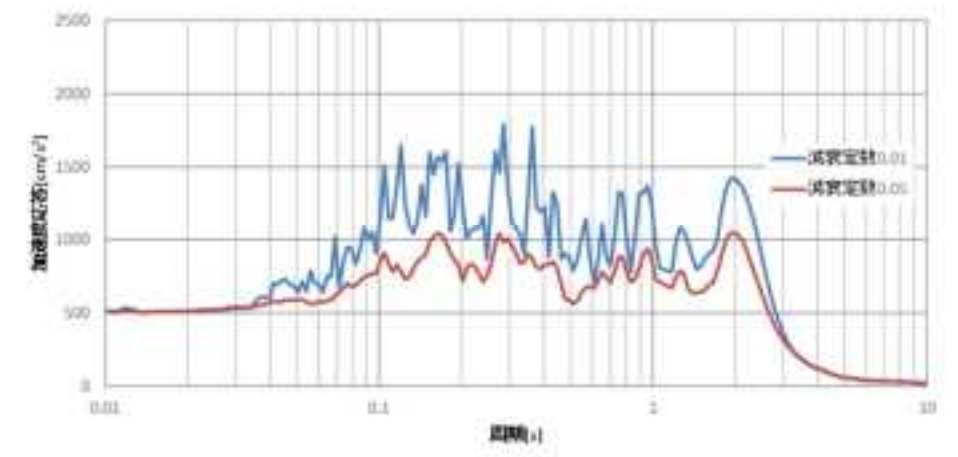


UD 方向 加速度時刻歴

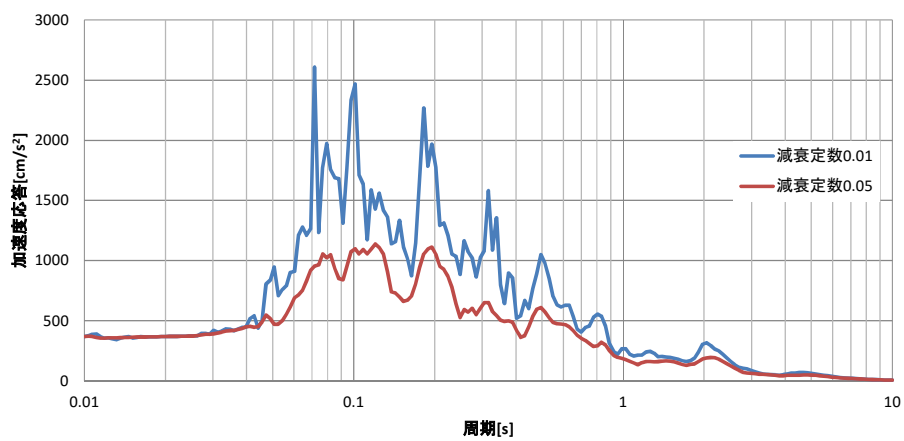
図 4-5-1 2007 年中越沖地震での観測波 ((NIG018)) の加速度時刻歴 ($\times 1.0$)



NS 方向 加速度応答スペクトル



EW 方向 加速度応答スペクトル



UD 方向 加速度応答スペクトル

図 4-5-2 2007 年中越沖地震での観測波 (NIG018) の加速度応答スペクトル ($\times 1.0$)

4.5.2 免震効果の確認

一体型解析モデルの解析結果から免震床の免震効果は、固定床(B1F)と免震床の応答結果を比較することにより検討する。

掲載した表、図を整理して以下に示す。

表 4-5-1 2007年中越沖地震の地震動による最大応答値(×1/3 入力)

図 4-5-3 中越沖地震 X 方向 B1F 固定床の加速度時刻歴

図 4-5-4 中越沖地震 X 方向 免震床の加速度時刻歴

図 4-5-5 中越沖地震 X 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-5-6 中越沖地震 X 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-5-7 中越沖地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

図 4-5-8 中越沖地震 Y 方向 免震床 加速度時刻歴

図 4-5-9 中越沖地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-5-10 中越沖地震 Y 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-5-11 中越沖地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

図 4-5-12 中越沖地震 Z 方向 免震床 加速度時刻歴

図 4-5-13 中越沖地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

図 4-5-14 中越沖地震 Z 方向 免震床 加速度応答スペクトル

図 4-5-15 中越沖地震 X 方向 相対変位時刻歴 (免震床—固定床)

図 4-5-16 中越沖地震 Y 方向 相対変位時刻歴 (免震床—固定床)

図 4-5-17 中越沖地震 Z 方向 相対変位時刻歴 (免震床—固定床)

(1) 応答加速度の比較

1) 水平方向 (X、Y 方向)

X 方向に関しては、表 4-5-1 の最大加速度の一覧より、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 1/2 程度となっている。加速度時刻歴においては、固定床の時刻歴で振幅の大きい 20~30s 間の振幅が低減されている。加速度応答スペクトルにおいては、固定床(B1F)に建物の 1 次固有周期である 0.2s 付近に大きなピークが見られるが、免震床では大きく低減されている。

Y 方向に関しては、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 1/3 程度と X 方向より小さくなっている。X 方向同様に、建物の 1 次固有周期である 0.2s 付近の成分は低減されている。

低減される割合が、2004 年中越地震より小さくなっているが、これは、固定床の応答において建物の 1 次周期である 0.2s 付近の卓越がより小さく、より広い周期成分の影響を受けていたためと考えられる。

2) 鉛直方向 (Z 方向)

最大加速度の一覧より、免震床の最大加速度は固定床(B1F)に対して 1/2%程度となっている。地震応答スペクトルに見られる周期に対する低減性は、中越地震とほぼ同様と考えられるが、最大加速度

の低減される割合が中越地震より大きくなったのは、固定床時刻歴波形に見られたスパイクが、免震床波形で小さくなっているためと考えられる。

(2) 層間変形の検討

免震床と固定床の相対変位について検討する。

1) 水平方向 (X、Y 方向)

表 4-5-1 の最大加速度の一覧より、最大相対変位は X 方向で 17cm、Y 方向で 12cm 程度であり、X 方向で大きくなっている。これは最大加速度と同様の傾向である。時刻歴波形を見ると、長周期となって振動していることがわかる。これは加速度波形でも見ることができる。

2) 鉛直方向 (Z 方向)

最大加速度の一覧より、最大相対変位は 0.4cm%程度であり、中越地震の場合の 2 倍低簿となっているが、水平方向と比較すると小さくなっている。

表 4-5-1 2007 年中越沖地震の地震動による最大応答値(×1/3 入力)

	最大加速度(cm/s ²)			最大相対変位(cm)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
入力地震動	222.3	171.2	123.0	—	—	—
固定床	296.0	236.7	201.7	—	—	—
免震床	106.1	69.4	106.5	16.6	11.7	0.390

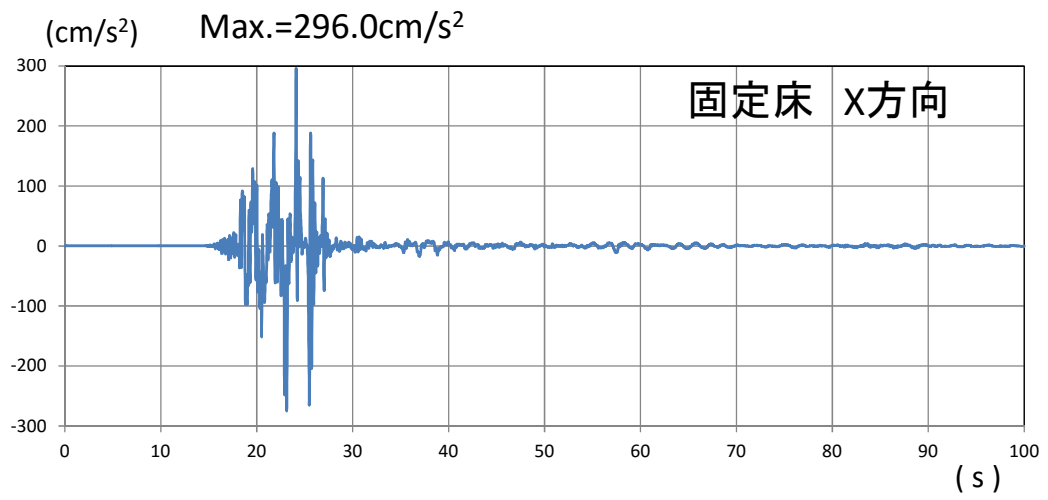


図 4-5-3 中越沖地震 X 方向 B1F 固定床の加速度時刻歴

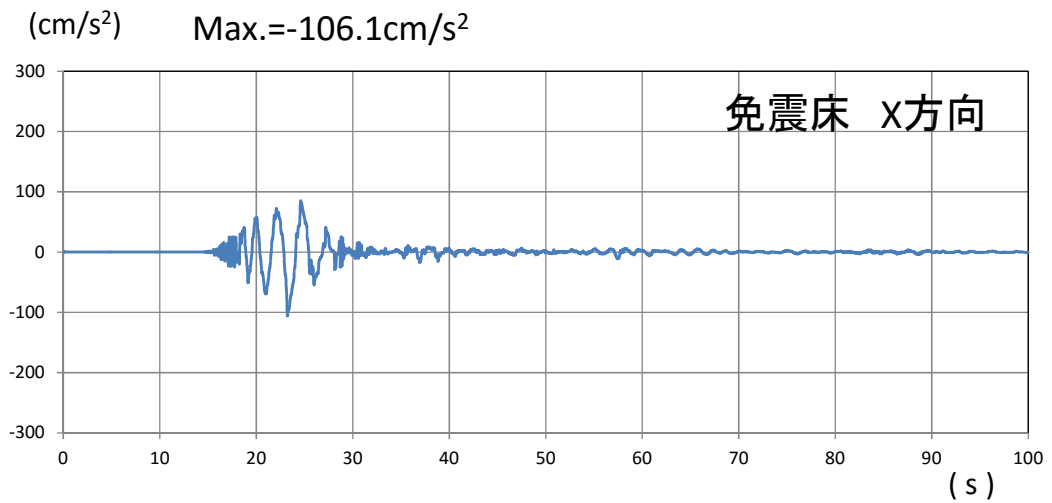


図 4-5-4 中越沖地震 X 方向 免震床の加速度時刻歴

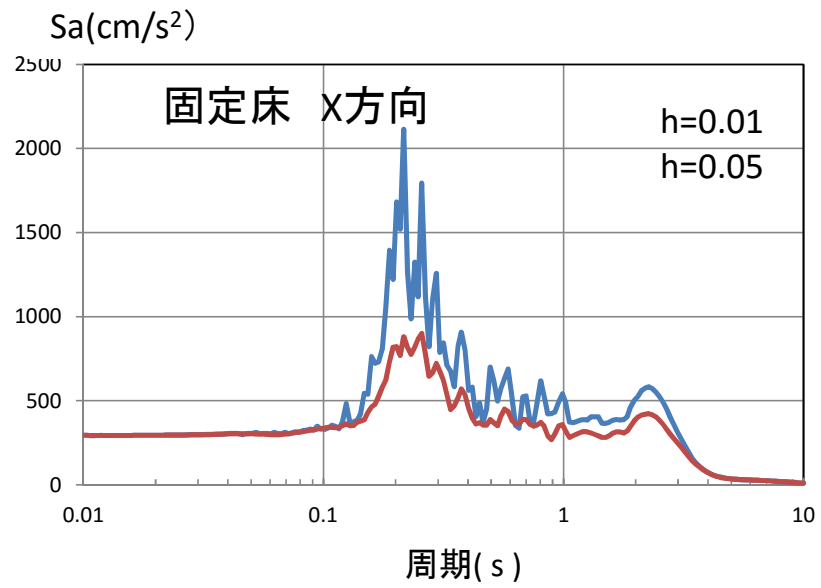


図 4-5-5 中越沖地震 X 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

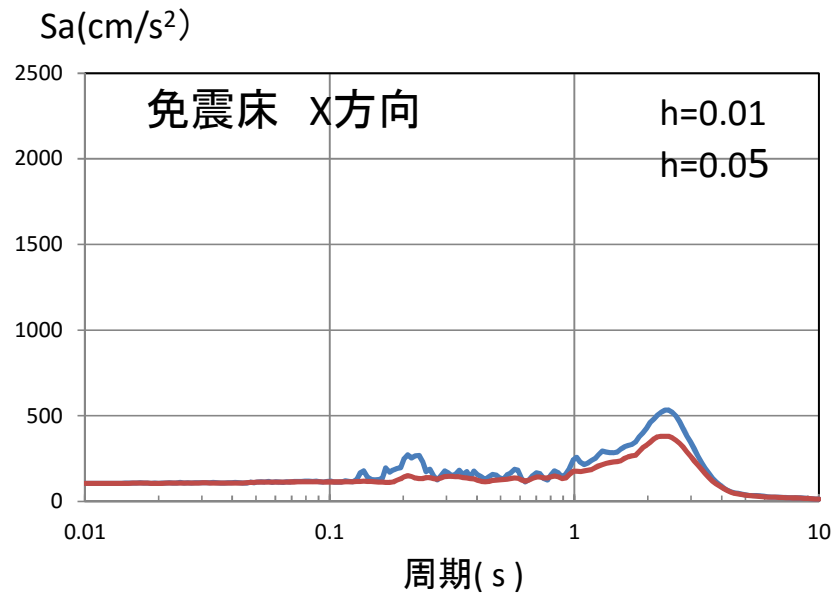


図 4-5-6 中越沖地震 X 方向 免震床 加速度応答スペクトル

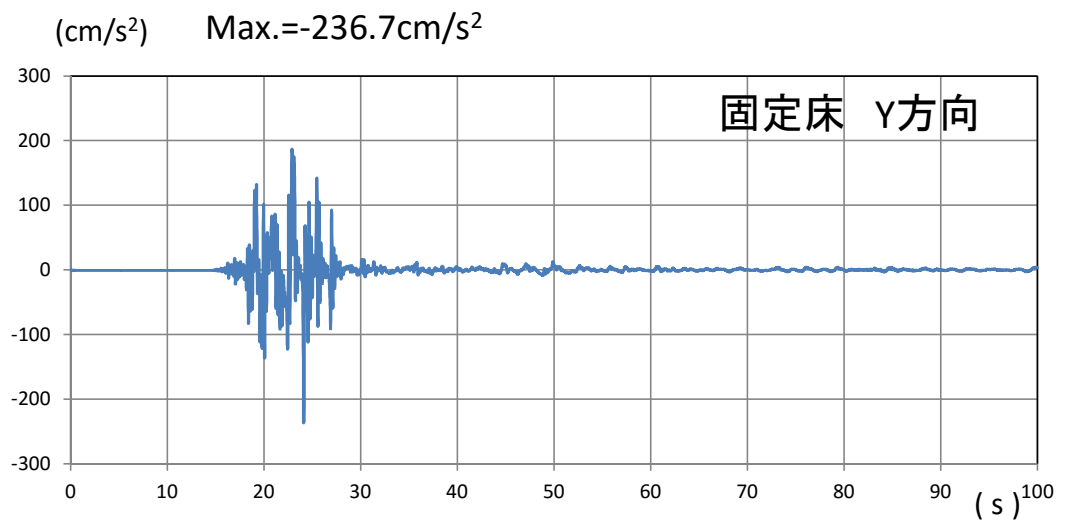


图 4-5-7 中越冲地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

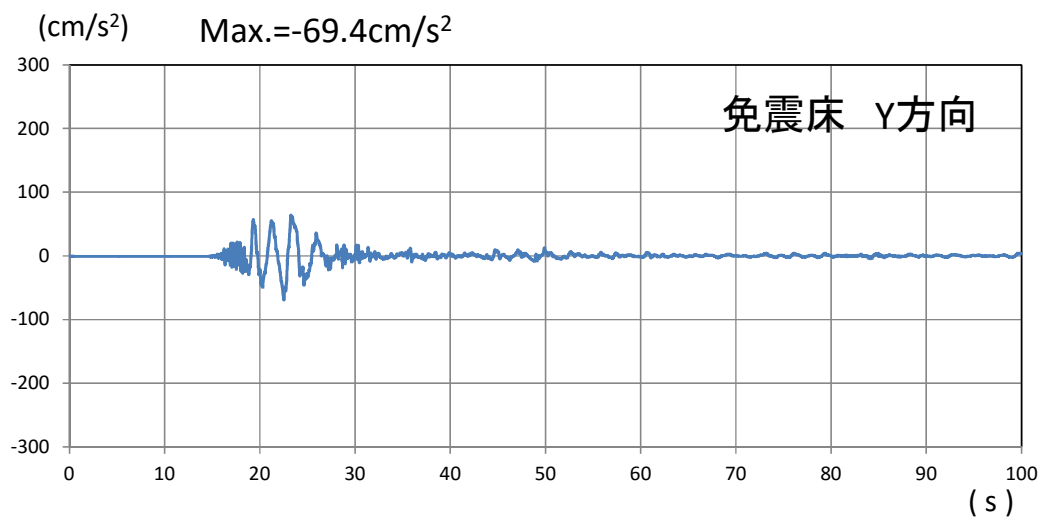


图 4-5-8 中越冲地震 Y 方向 免震床 加速度時刻歴

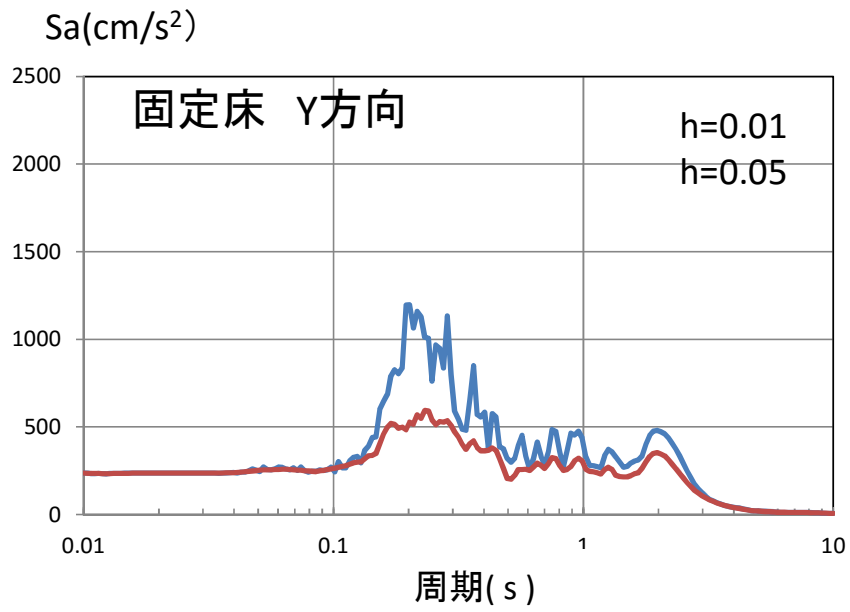


図 4-5-9 中越沖地震 Y 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

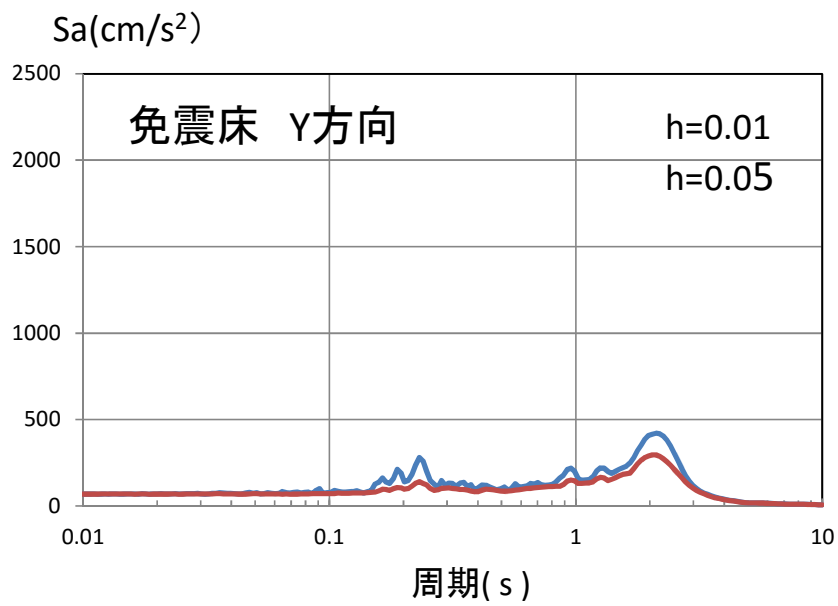


図 4-5-10 中越沖地震 Y 方向 免震床 加速度応答スペクトル

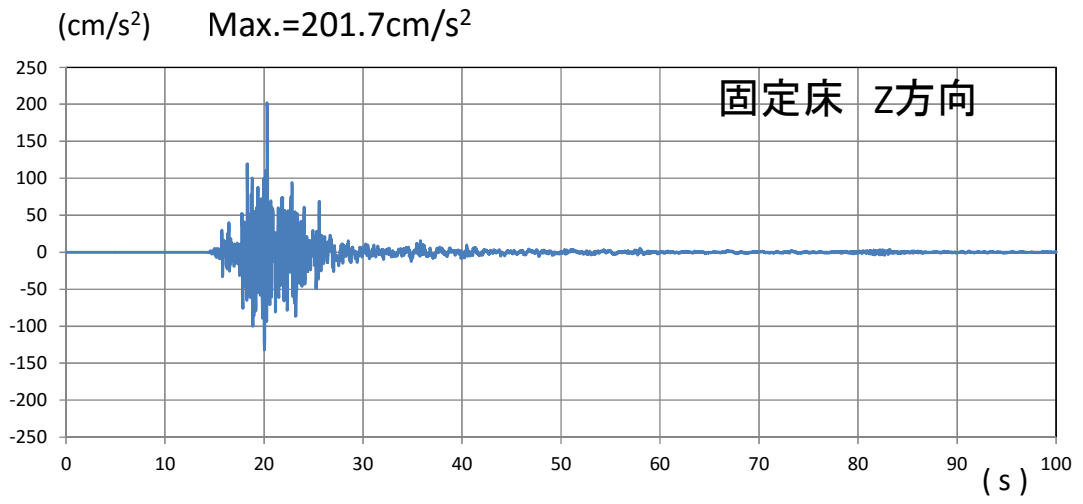


图 4-5-11 中越冲地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度時刻歴

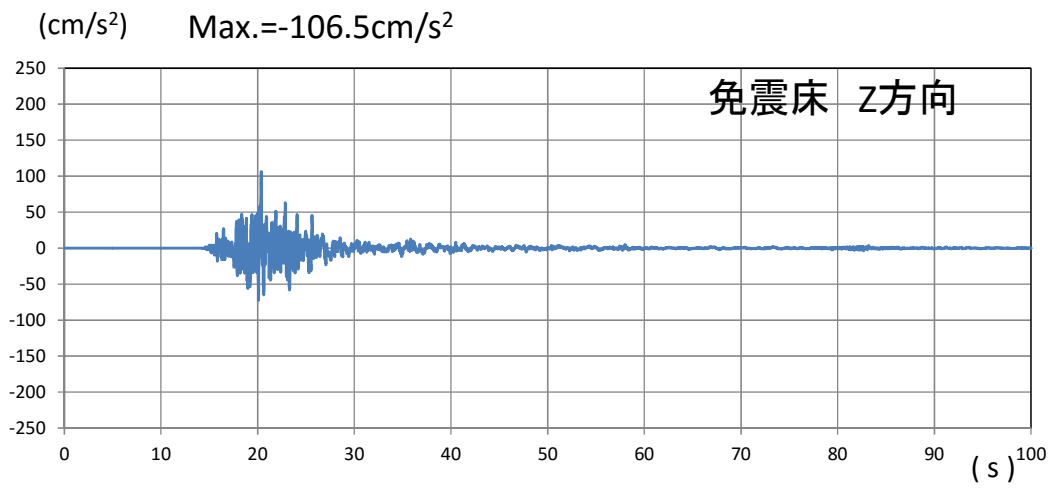


图 4-5-12 中越冲地震 Z 方向 免震床 加速度時刻歴

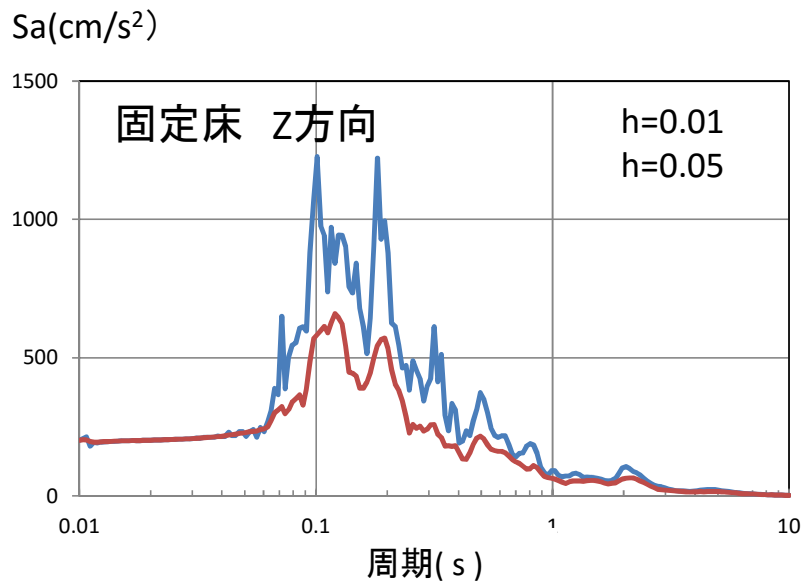


図 4-5-13 中越沖地震 Z 方向 B1F 固定床 加速度応答スペクトル

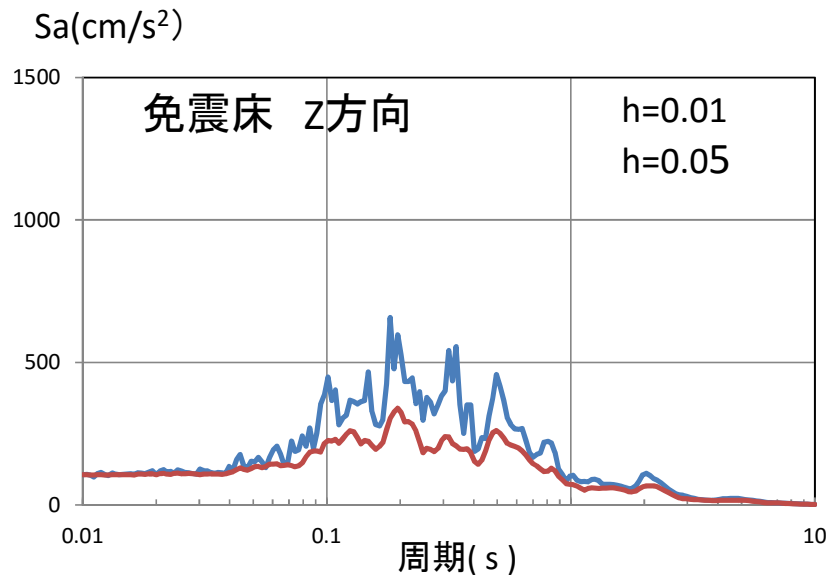


図 4-5-14 中越沖地震 Z 方向 免震床 加速度応答スペクトル

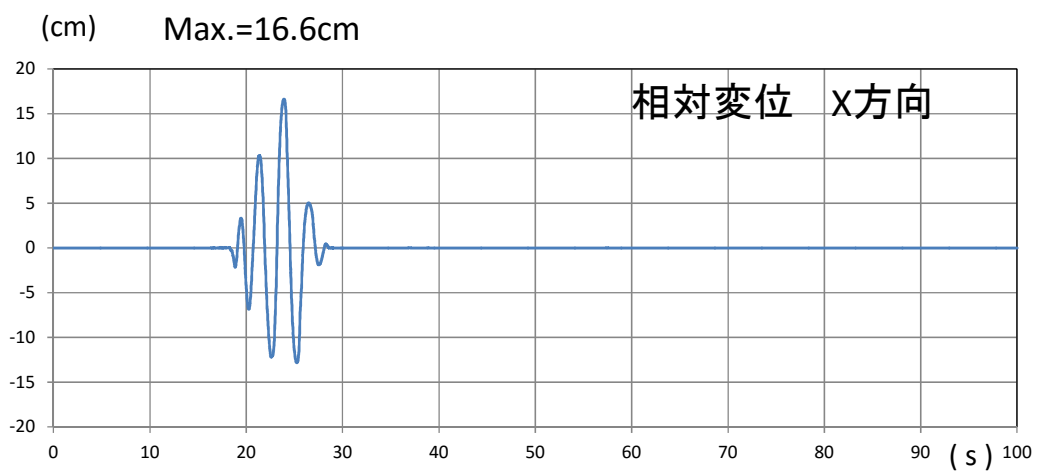


图 4-5-15 中越冲地震 X 方向 相对变位时刻历 (免震床—固定床)

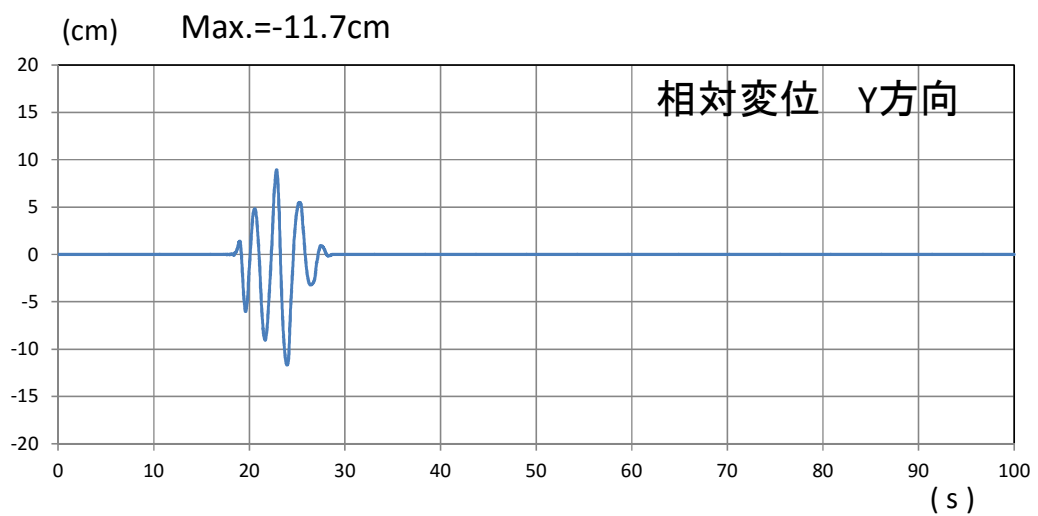


图 4-5-16 中越冲地震 Y 方向 相对变位时刻历 (免震床—固定床)

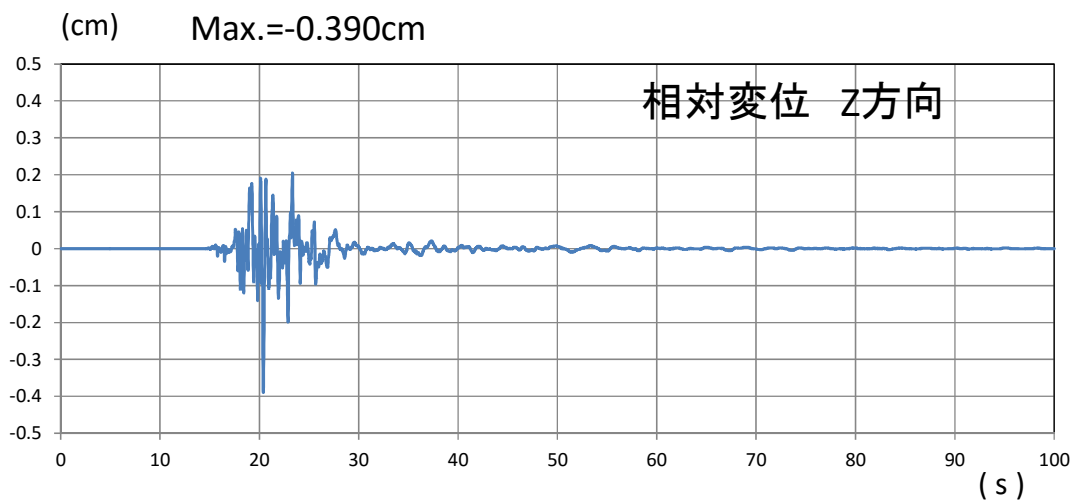


图 4-5-17 中越冲地震 Z 方向 相对变位时刻历 (免震床—固定床)

4.6 地震応答解析結果のまとめ

(1) 3次元免震床モデルによる地震応答解析

3章の水平方向加力実験結果反映して、免震床の3次元解析モデルを作成した。水平2方向の相関性はMSSモデルでモデル化した。

作成した振動解析モデルの妥当性を2011年長野県北部地震による地震観測記録と比較することにより実施した。解析モデルへの入力地震動として免震床の固定床での観測記録を用い、免震床での応答結果を観測記録とを比較する。水平方向の観測記録では、固定床で建物の1次周期成分と思われる周期0.15~0.2s付近の成分が卓越していたが、免震床の記録ではその卓越成分が低減されていた。この傾向を、解析結果はよく再現することが出来た。

鉛直方向では地震観測記録と比較することが出来なかった。解析結果を見ると、固有周期は0.5s以下の比較的短周期で、低減効果を見ることができた。

本地震観測記録は、水平方向で10mm程度と考えられ、設定した復元力特性で対象としている振幅より小さいものであったが、観測記録と解析結果の対応関係は良く、解析モデルの妥当性を確認することが出来た。

(2) 建物-免震床一体型3次元振動解析モデルによる地震応答解析

周辺地盤の影響を考慮した建物の3次元振動解析モデルを作成し、免震床モデルと組合せることにより、建物-免震床一体型の3次元振動解析モデルを構築した。

建物基礎への入力地震動は、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震での柏崎での観測記録を用いた。

主に固定床(B1F)と免震床の応答加速度を比較することにより、免震効果を確認した。水平方向の応答加速度が低減される割合は、中越地震でより大きかった。これは、基礎入力地震動の相違であるが、建物の1次周期が卓越する割合が中越地震でより大きかったため、特定の周期帯で免震効果が大きく表れたためと考えられる。

5. 建物内に新たな加速度計の設置

5.1 目的

免震床への入力地震動は建物の応答波となるので、建物の振動モデル評価も重要な問題となる。本共同研究では新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター内の最下階の床位置に地震観測用の加速度計を設置し、これまで実施してきた固定床、免震床での加速度計と同時に、地震観測を可能できるようにするものである。

5.2 加速度と設置位置

加速度計は、建物内の Z, Y, Z の 3 成分を観測するために 3 つ設置し、収録は現在の免震床地震観測システムの一部として取り込めるようにする。

(1) 加速度計

加速度計は現在、固定床 (B1F) 及び免震床に設置されているサーボ型加速度計と同じものを用いる。サーボ型加速度計の仕様を図 5-2-1 に示す。

(2) 加速度計位置

加速度計の設置位置 (B2F) を平面図と断面図中に図 5-2-2 として示す。

ASQ[®]-D

サーボ型加速度変換器

●9.807~49.03m/s² ●微小振動測定用, IP67



微小振動を高感度測定 車両・構造物、地盤等の振動測定に最適

- DC~100Hzまでの範囲の加速度が測定できる (DC~300Hzはご希望により製作可能)
- 小型軽量, 高精度, 高出力

ASQ型変換器は、従来のひずみゲージ式加速度変換器と異なり、サーボ機構を持つために、微小振動を精度よく高感度測定でき、安定度、信頼性のすぐれた変換器です。本器の測定には、専用コンディショナ (VAQ型) が準備されています。本器の用途は、車両走行による振動、地震・風などによる構造物および地盤などの振動、一般の低周波振動の測定などが挙げられます。(ASQは商標登録済)

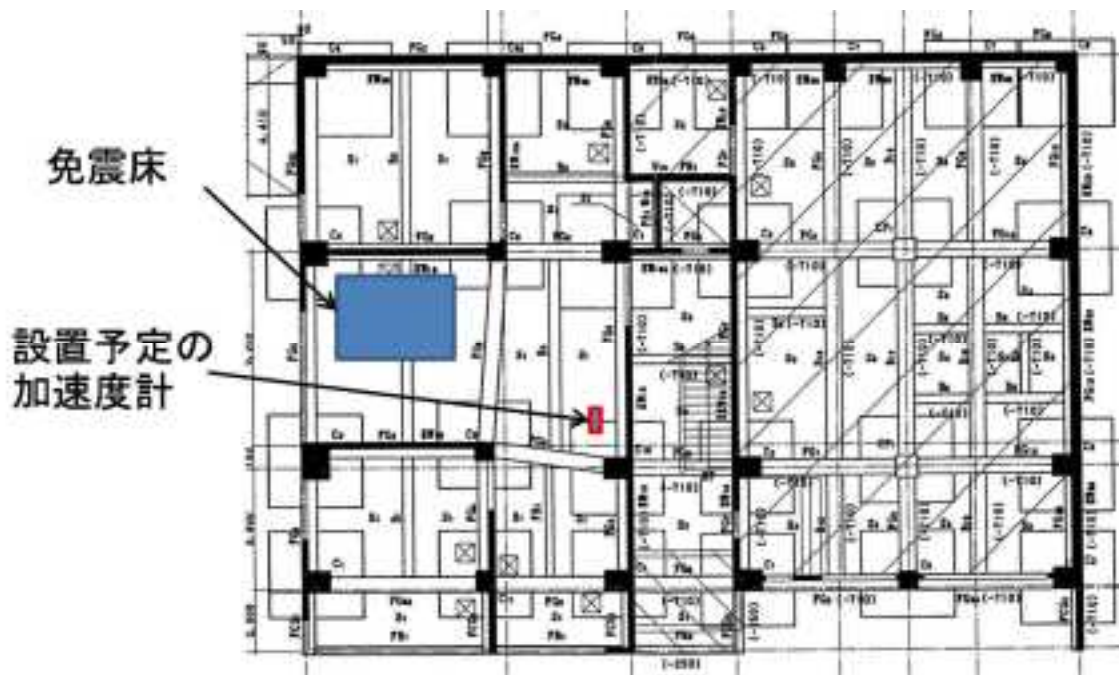
仕様

性能	仕様
定格容量	表参照
非直線性	±0.03%RD以内
ヒステリシス	±0.06%RD以内
定格出力	±5V (10V) ±5%
許容温度範囲	-20~80°C
温度補償範囲	-10~80°C
零点の温度影響	±0.06%RD/°C以内
出力の温度影響	±0.06%/°C以内
電源	DC±11~±16V 40mA以下 (推奨±12V) 専用シグナルコンディショナVAQ-700A使用時は、シグナルコンディショナより供給
ケーブル	専用接続ケーブル N-41 (ASQ-DとVAQ-700Aとの接続用) 0.2mm ² 6心シールドビニール50m, 外径5.8mm (原形) 1Gキャンセルケーブル N-45 0.2mm ² 6心シールドビニール40m, 外径5.8mm, 適合コネクタ 272PCW-12P (別売) (ワイトコオプティカル電通株式会社製)
応答周波数範囲	DC~100Hz (感度減衰±10%) (DC~300Hzはご希望による)
精度	±0.3%以内
保護等級	IP67
質量	約220g (ケーブル含まず)

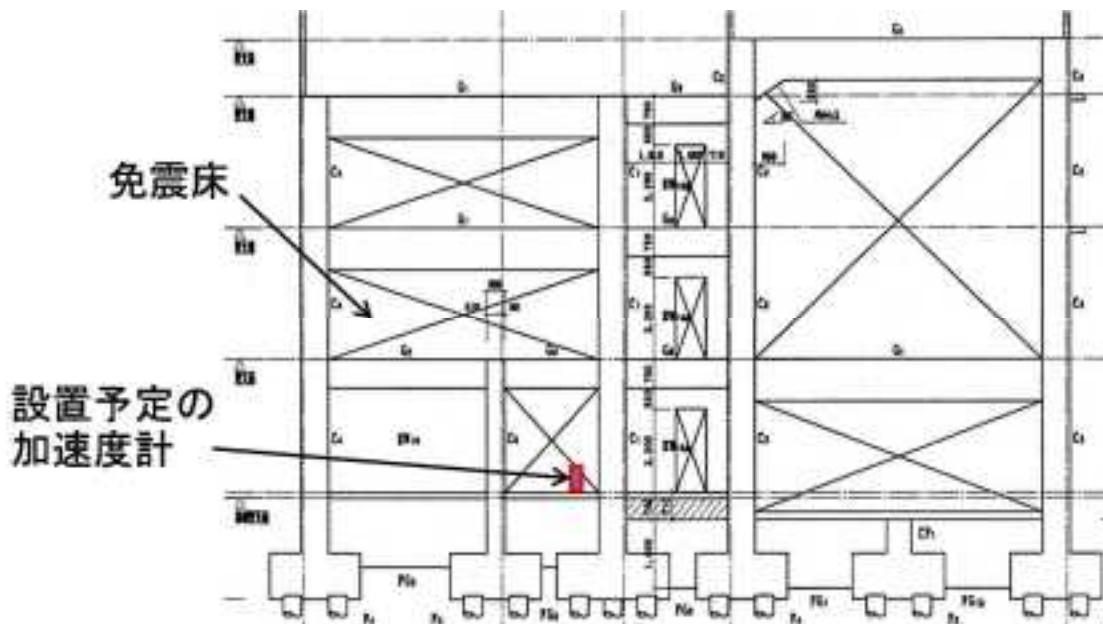
標準付属品 5角穴付ボルト (M4長25) 2本, 取扱説明書
別売品 接続ケーブル N-41 長さ50m, N-42 長さ5m
1Gキャンセルケーブル N-45 長さ40cm

型名	定格容量
ASQ-D-1	±9.807m/s ² (±1G)
ASQ-D-2	±19.61m/s ² (±2G)
ASQ-D-5	±49.03m/s ² (±5G)

図 5-2-1 設置する加速度計の仕様



平面図



断面図

図 5-2-2 加速度計の設置位置

6. まとめ

新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター内に設置されている3次元床免震装置を用い性能確認試験(水平方向加力試験)を行い、その結果を反映した3次元振動解析モデルを構築し、地震応答解析を実施した。その結果として得られた知見等を以下に示す。

- 1) 水平加力実験は、昨年度の実験の高度化を行うことが出来た。長辺、短辺方向など多くの方向からの1軸方向加力に加え、2方向同時加力を実施し、3次元解析モデル構築のためのデータを得ることが出来た。
- 2) 免震床の3次元解析モデルを構築し、2011年3月12日長野県北部地震による免震床での地震観測記録と振動解析モデルを用いた地震応答解析結果を比較し、解析モデルの妥当性の検証を行った。その結果、作成した振動解析モデルが妥当であると判断された。また、地震観測記録からも免震効果を確認することが出来た。
- 3) 周辺地盤の影響を考慮した建物の3次元振動解析モデルと免震床振動モデルと組み合わせた一体型3次元振動解析モデルを構築し、地震応答解析を実施した。建物への入力地震動は2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震でのk-net 柏崎観測点の観測記録を使用し、免震床での応答結果を免震床固定床と結果と比較した。その結果、良好な免震効果が得られていることが確認された。
- 4) 本研究の性能確認試験及び地震応答解析から得られた結果は、免震構造の審査に役立つ試設計例及び試評価例として有効な資料になると考えられる。

参考文献

- 1)新潟工科大学 共同研究 3次元免震床の性能確認に関する研究 報告書 平成25年3月15日
- 2)三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社：新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター新築工事3次元免震床工事 完成図書，平成22年11月
- 3)株式会社山下設計：(仮称)新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター新築工事 建築構造図及び構造計算書，平成22年2月
- 4)三菱重鉄構エンジニアリング株式会社：粘性ダンパー実験結果、粘性体量の調整、およびダンパー支持材合成について、平成25年1月
- 5)柴田明德 著：最新 耐震構造解析 第2版、2003年5月、森北出版株式会社
- 6)西川孝夫他 著：建築の振動 初歩から学ぶ建物の揺れ、2005年1月、朝倉書店
- 7)田治見宏 著：建築振動学、1965年5月、コロナ社
- 8)大崎順彦 著：建築振動理論、1996年11月、彰国社
- 9)大崎順彦 著：新・地震動のスペクトル解析入門、1994年5月、鹿島出版会
- 10)日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告、2006年8月
- 11)日本建築学会：2007年能登半島地震災害調査報告 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告、2010年3月
- 12)日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006年2月

付録-A

水平方向加力実験結果

実験結果の一覧

掲載No.	変位量 [mm]	ファイル名 (CSV)	テキストデータ (CSV)	備考
(1)	150	20131210_0001	1方向加力 X(+)方向 パターンA 1回目	
		20121210_0002	1方向加力 X(+)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0003	1方向加力 X(+)方向 パターンA 3回目	
(2)		20131210_0004	1方向加力 X(-)方向 パターンA 1回目	
		20131210_0005	1方向加力 X(-)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0006	1方向加力 X(-)方向 パターンA 3回目	
(3)		20131210_0007	1方向加力 Y(+)方向 パターンA 1回目	
		20131210_0008	1方向加力 Y(+)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0009	1方向加力 Y(+)方向 パターンA 3回目	
(4)		20131210_0010	1方向加力 Y(-)方向 パターンA 1回目	
		20131210_0011	1方向加力 Y(-)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0012	1方向加力 Y(-)方向 パターンA 3回目	
(5)		20131210_0013	1方向加力 45(+)方向 パターンA 1回目	
		20131210_0014	1方向加力 45(+)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0015	1方向加力 45(+)方向 パターンA 3回目	
(6)		20131210_0016	1方向加力 45(-)方向 パターンA 1回目	
		20131210_0017	1方向加力 45(-)方向 パターンA 2回目	
		20131210_0018	1方向加力 45(-)方向 パターンA 3回目	
(7)	150	20131211_0001	1方向加力 対角(+)方向 パターンA 1回目	
		20131211_0002	1方向加力 対角(+)方向 パターンA 2回目	
		20131211_0003	1方向加力 対角(+)方向 パターンA 3回目	
(8)		20131211_0004	1方向加力 対角(-)方向 パターンA 1回目	
		20131211_0005	1方向加力 対角(-)方向 パターンA 2回目	
		20131211_0006	1方向加力 対角(-)方向 パターンA 3回目	
(13)	150	20131213_0001	2方向加力 ①(45度) 1回目	
		20131213_0002	2方向加力 ①(45度) 2回目	
		20131213_0003	2方向加力 ①(45度) 3回目	
		20131213_0004	2方向加力 ①(45度) 4回目	
		20131213_0005	2方向加力 ①(45度) 5回目	
(14)	150	20131218_0001	2方向加力 ④(X:Y=1:2) 1回目	
		20131218_0002	2方向加力 ④(X:Y=1:2) 2回目	
		20131218_0003	2方向加力 ④(X:Y=1:2) 3回目	
		20131218_0004	2方向加力 ④(X:Y=1:2) 4回目	
		20131218_0005	2方向加力 ④(X:Y=1:2) 5回目	
(15)		20131218_0006	2方向加力 ③(X:Y=2:1) 1回目	
		20131218_0007	2方向加力 ③(X:Y=2:1) 2回目	
		20131218_0008	2方向加力 ③(X:Y=2:1) 3回目	
		20131218_0009	2方向加力 ③(X:Y=2:1) 4回目	
		20131218_0010	2方向加力 ③(X:Y=2:1) 5回目	
(16)	20131218_0011	2方向加力 ②(対角) 1回目		
	20131218_0012	2方向加力 ②(対角) 2回目		
	20131218_0013	2方向加力 ②(対角) 3回目		
	20121211_0014	2方向加力 ②(対角) 4回目		
	20121211_0015	2方向加力 ②(対角) 5回目		
(9)	150	20131220_0003	1方向加力 X(+)方向 パターンB 1回目	
		20131220_0004	1方向加力 X(+)方向 パターンB 2回目	
		20131220_0005	1方向加力 X(+)方向 パターンB 3回目	
(10)		20131220_0006	1方向加力 X(+)方向 パターンC 1回目	
		20131220_0007	1方向加力 X(+)方向 パターンC 2回目	
		20131220_0008	1方向加力 X(+)方向 パターンC 3回目	
(11)		20131220_0009	1方向加力 Y(+)方向 パターンB 1回目	
		20131220_0010	1方向加力 Y(+)方向 パターンB 2回目	
		20131220_0011	1方向加力 Y(+)方向 パターンB 3回目	
(12)		20131220_0012	1方向加力 Y(+)方向 パターンC 1回目	
		20131220_0013	1方向加力 Y(+)方向 パターンC 2回目	
		20131220_0014	1方向加力 Y(+)方向 パターンC 3回目	

水平方向加力実験結果

(1) 1 方向加力, X(+)方向(加力パターン A)

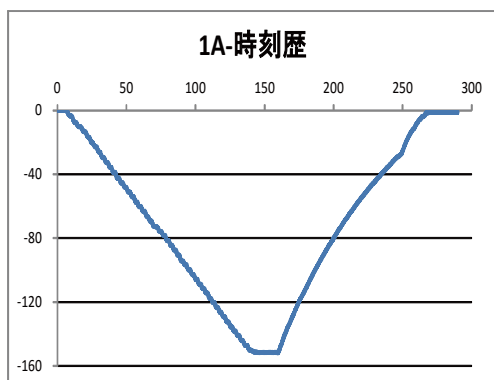
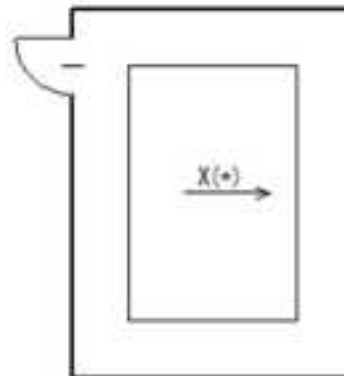
荷重 1 : 加力方向の荷重

変位 1A : 免震床の加力方向変位

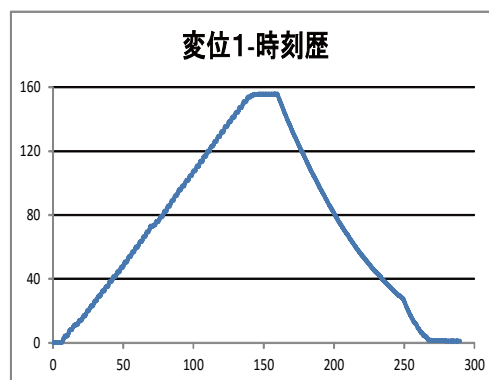
変位 1 : シリンダヘッドの変位

1) 実験結果の例

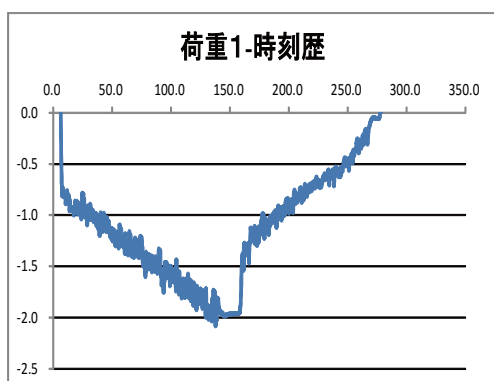
ファイル名 : 20131210_0001



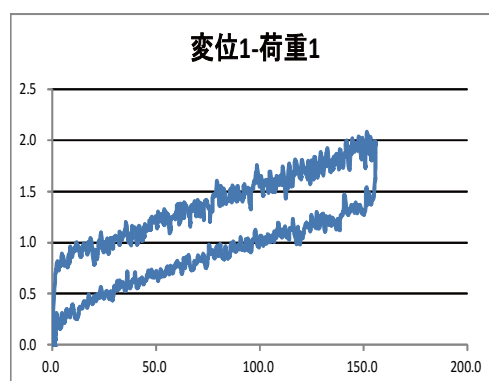
X(+)方向 1A-時刻歴関係



X(+)方向 変位 1-時刻歴関係



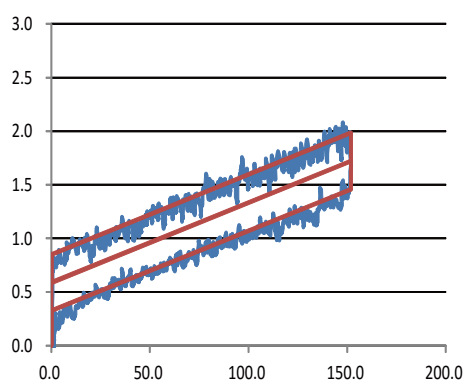
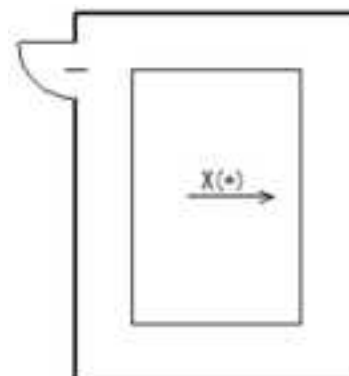
X(+)方向 荷重 1-時刻歴関係



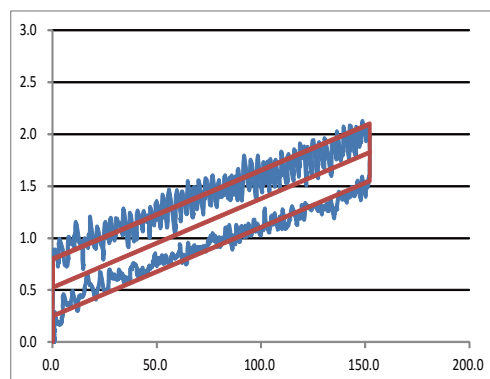
X(+)方向 変位 1-荷重 1 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

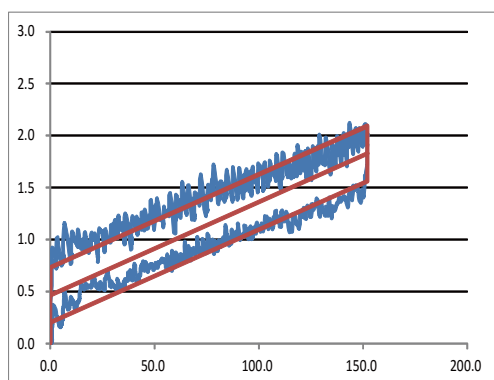
ファイル名 : 20131210_0001
20131210_0002
20131210_0003



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 1 回目



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 2 回目



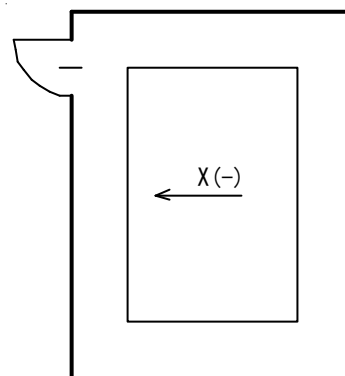
X(+)方向 1A-荷重 1 関係 3 回目

(2) 1 方向加力,X(-)方向(加力パターン A)

荷重 1 : 加力方向の荷重

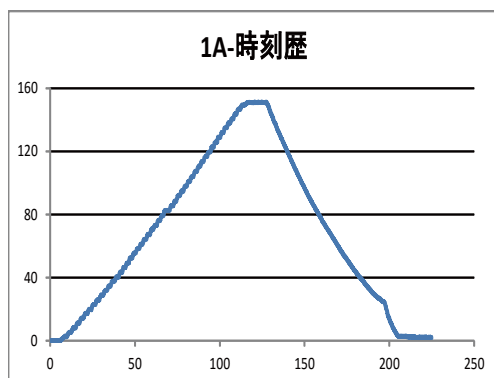
変位 1A : 免震床の加力方向変位

変位 1 : シリンダヘッドの変位

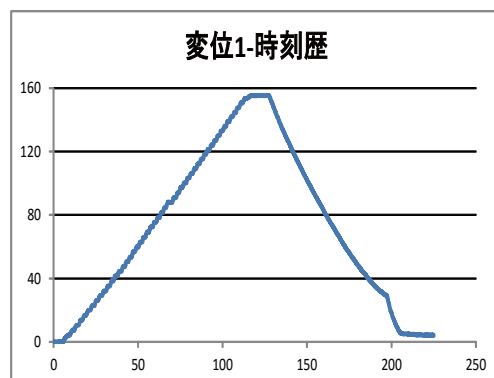


1)実験結果の例

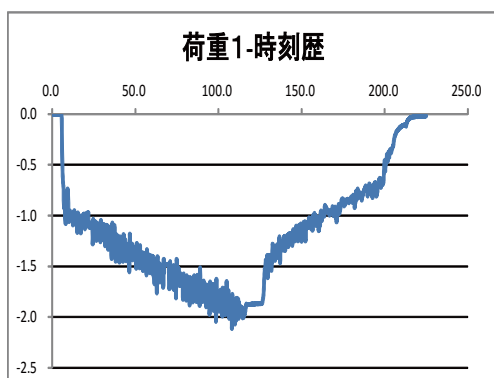
ファイル名 : 20131210_0004



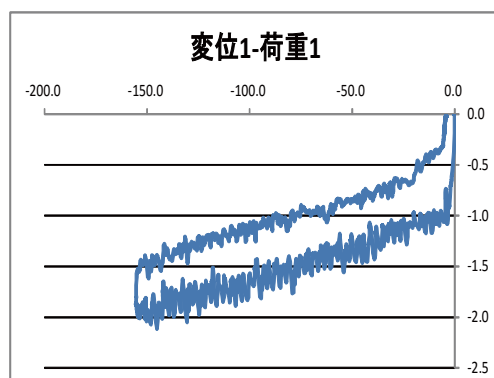
X(-)方向 1A-時刻歴関係



X(-)方向 変位 1-時刻歴関係



X(-)方向 荷重 1-時刻歴関係



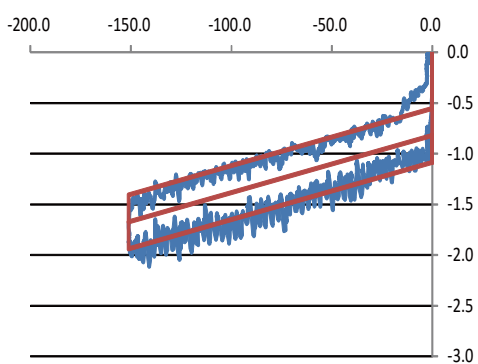
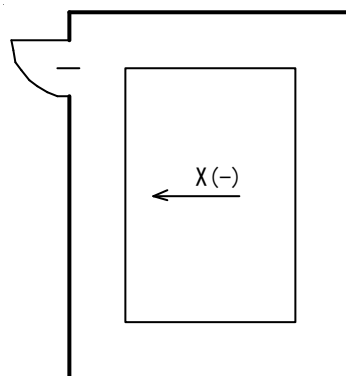
X(-)方向 変位 1-荷重 1 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

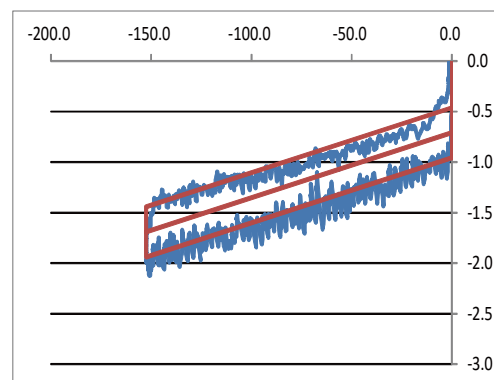
ファイル名 : 20131210_0004

20131210_0005

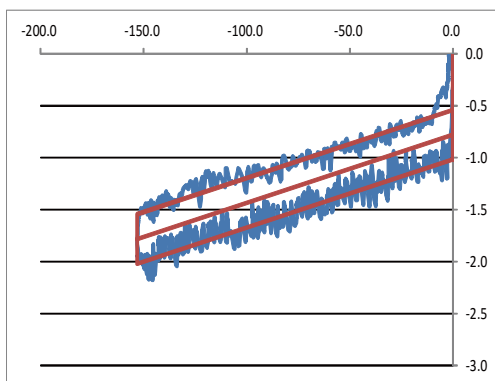
20131210_0006



X(-)方向 1A-荷重 1 関係 1 回目



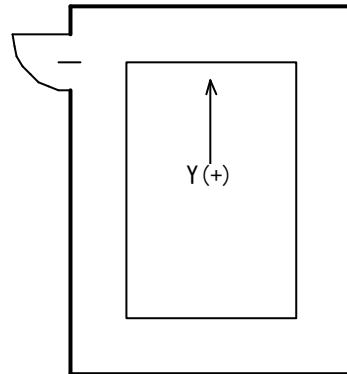
X(-)方向 1A-荷重 1 関係 2 回目



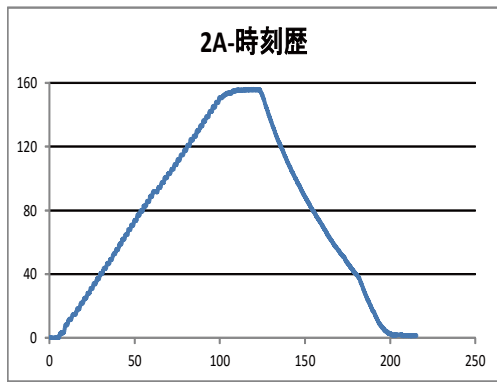
X(-)方向 1A-荷重 1 関係 3 回目

(3) 1 方向加力,Y(+)方向(加力パターン A)

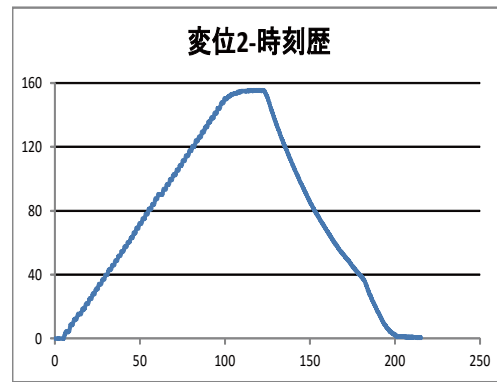
荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位



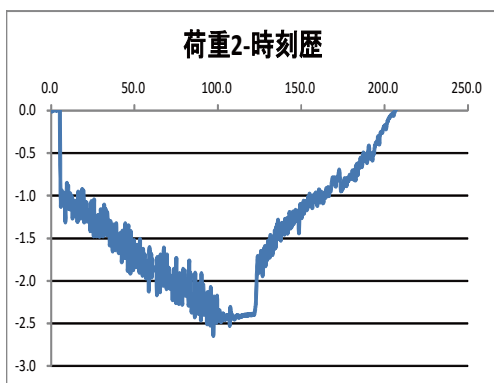
1)実験結果の例
ファイル名 : 20131210_0007



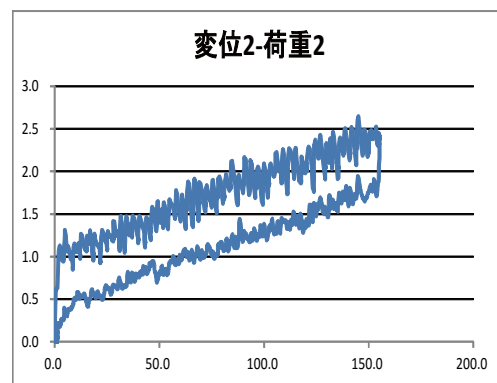
Y(+)方向 2A-時刻歴関係



Y(+)方向 変位 2-時刻歴関係



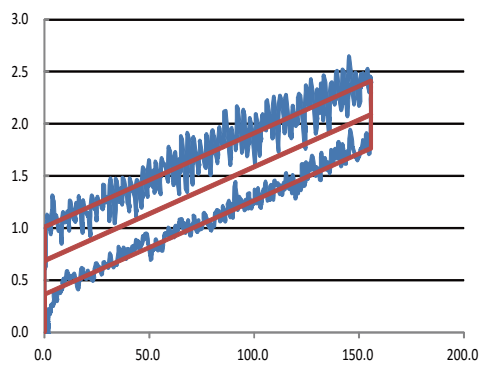
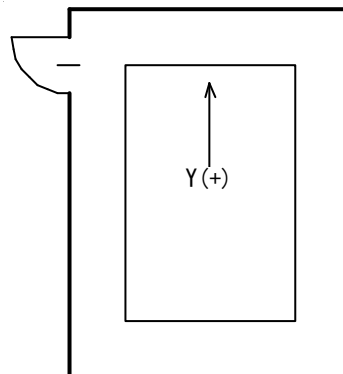
Y(+)方向 荷重 2-時刻歴関係



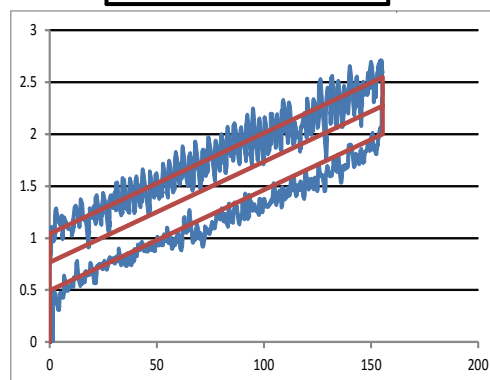
Y(+)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

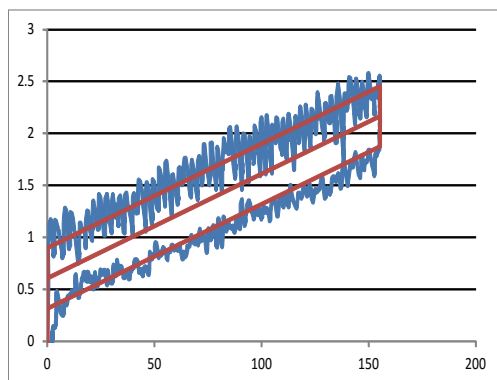
ファイル名 : 20131210_0007
20131210_0008
20131210_0009



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

(4) 1 方向加力,Y(-)方向(加力パターン A)

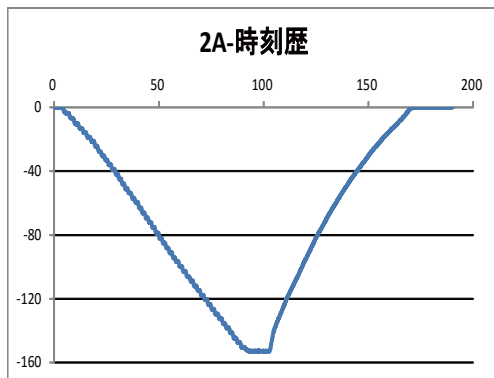
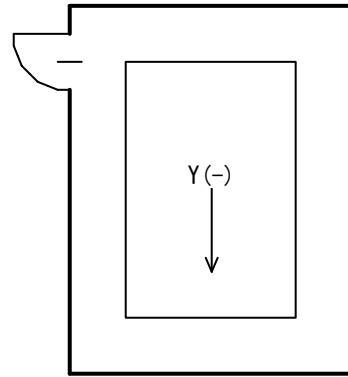
荷重 2 : 加力方向の荷重

変位 2A : 免震床の加力方向変位

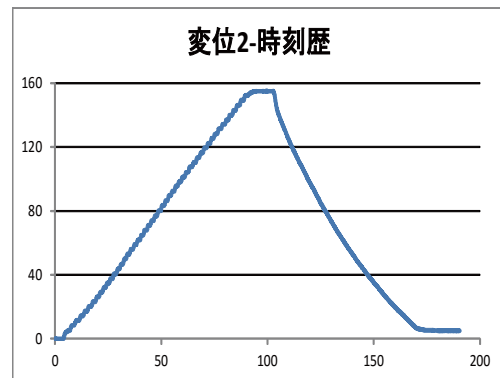
変位 2 : シリンダヘッドの変位

1) 実験結果の例

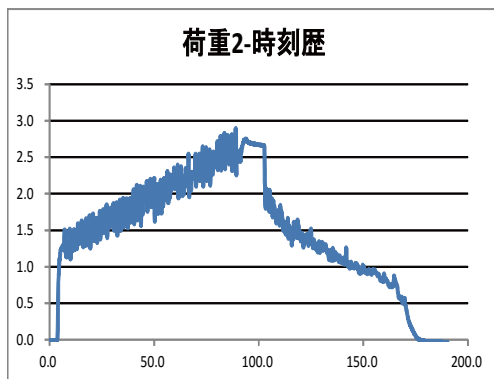
ファイル名 : 20131210_0010



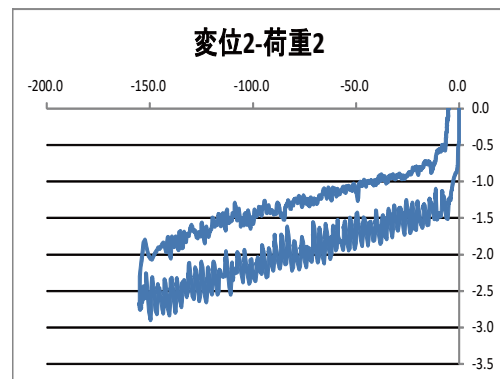
Y(-)方向 2A-時刻歴関係



Y(-)方向 変位 2-時刻歴関係



Y(-)方向 荷重 2-時刻歴関係



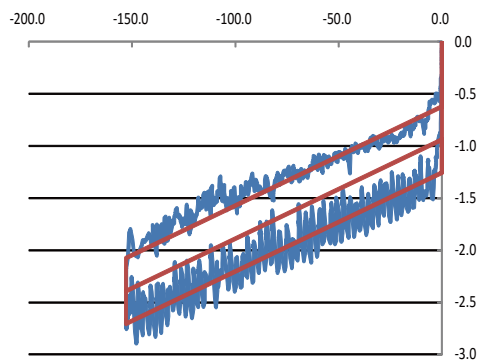
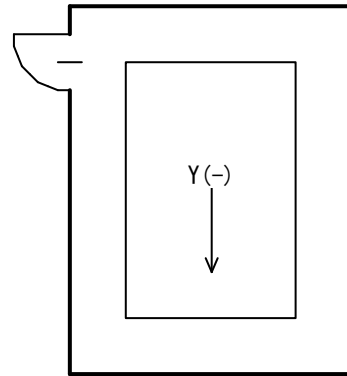
Y(-)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

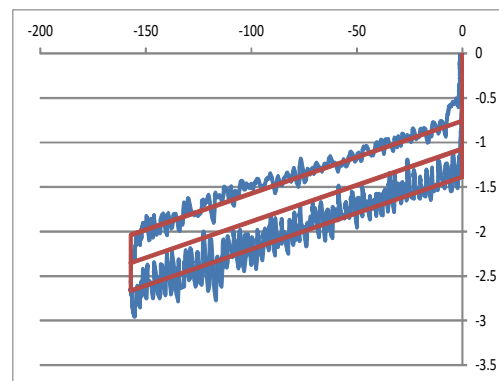
ファイル名 : 20131210_0010

20131210_0011

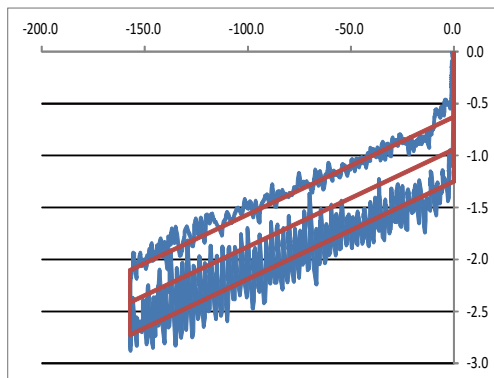
20131210_0012



Y(-)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



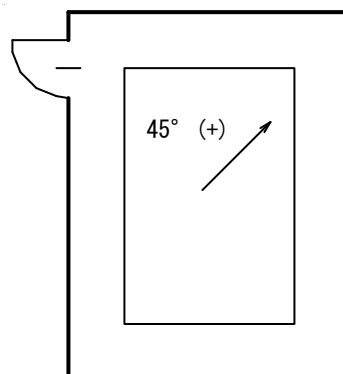
Y(-)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

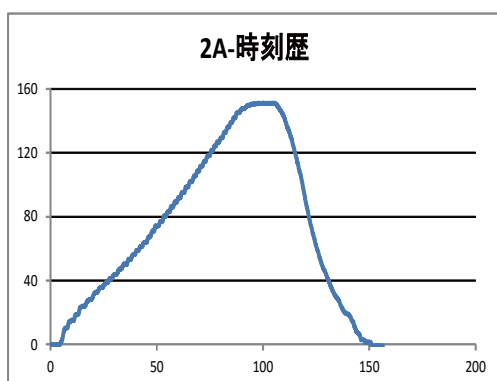
(5) 1 方向加力,45 度(+)方向(加力パターン A)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

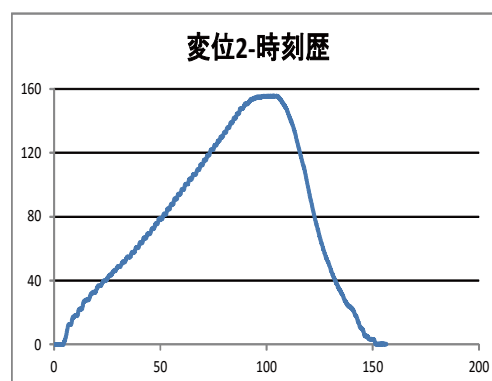


1) 実験結果の例

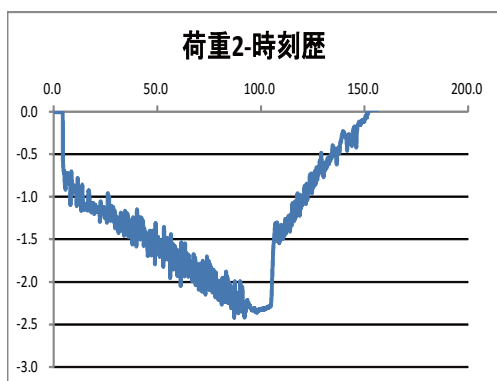
ファイル名 : 20131210_0013



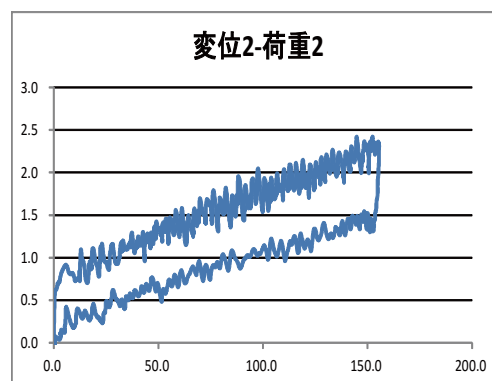
45° (+)方向 2A-時刻歴関係



45° (+)方向 変位 2-時刻歴関係



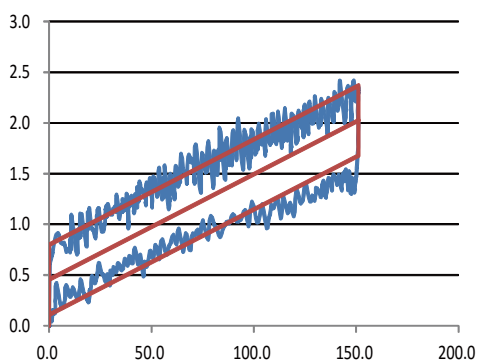
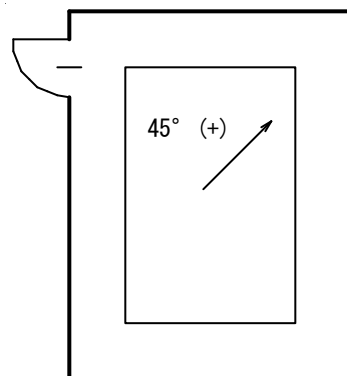
45° (+)方向 荷重 2-時刻歴関係



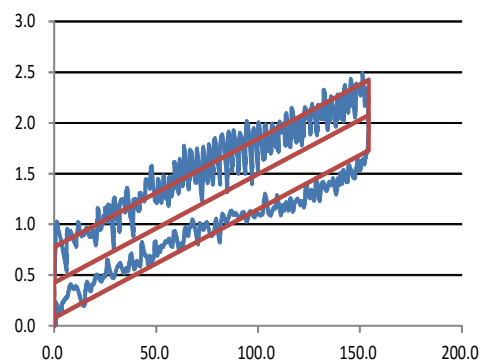
45° (+)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

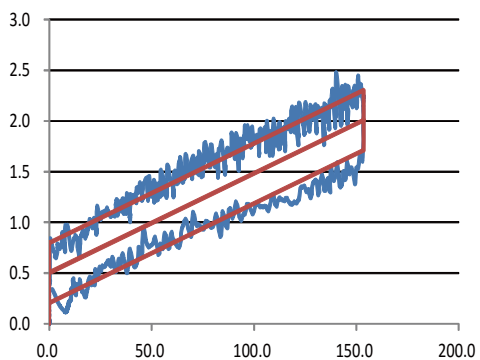
ファイル名 : 20131210_0013
20131210_0014
20131210_0015



45° (+)方向 2A-荷重2 関係 1回目



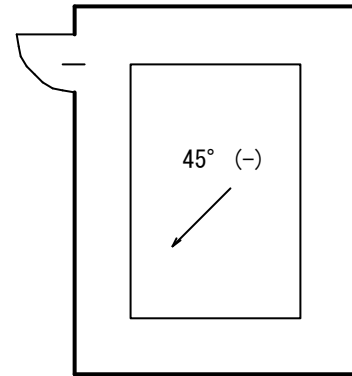
45° (+)方向 2A-荷重2 関係 2回目



45° (+)方向 2A-荷重2 関係 3回目

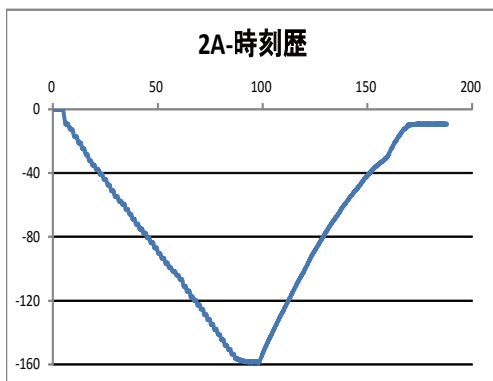
(6) 1 方向加力,45 度(-)方向(加力パターン A)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

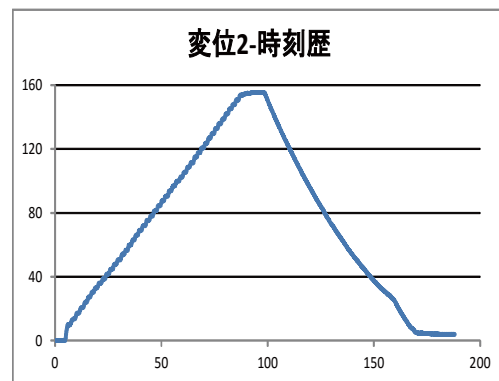


1) 実験結果の例

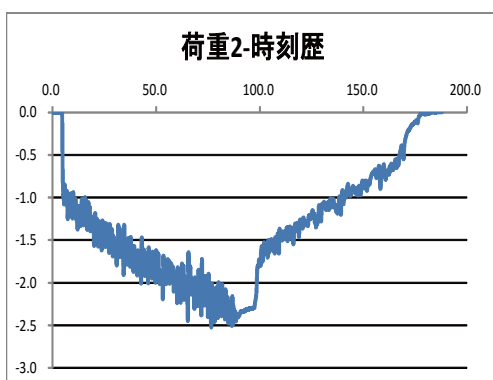
ファイル名 : 20131210_0016



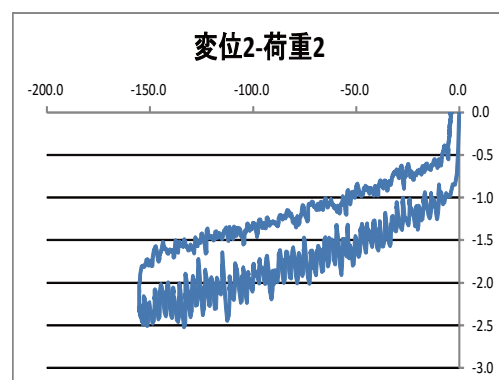
45° (-)方向 2A-時刻歴関係



45° (-)方向 変位 2-時刻歴関係



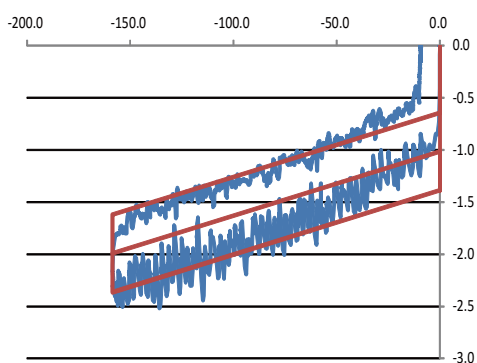
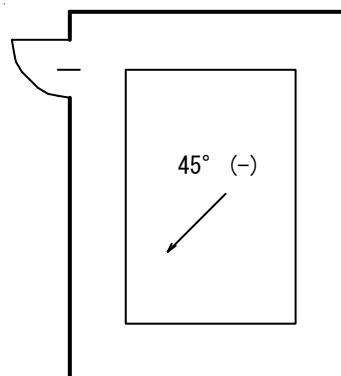
45° (-)方向 荷重 2-時刻歴関係



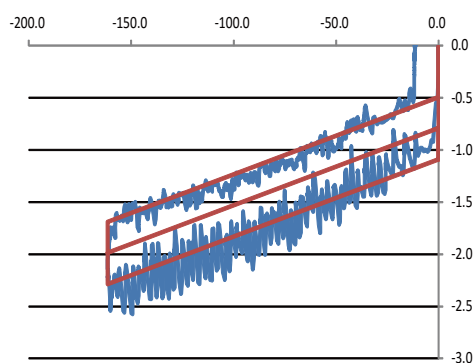
45° (-)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

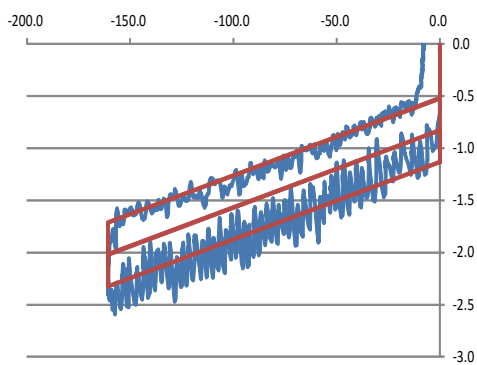
ファイル名 : 20131210_0016
20131210_0017
20131210_0018



45° (-)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



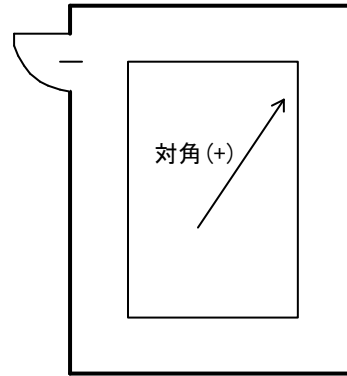
45° (-)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



45° (-)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

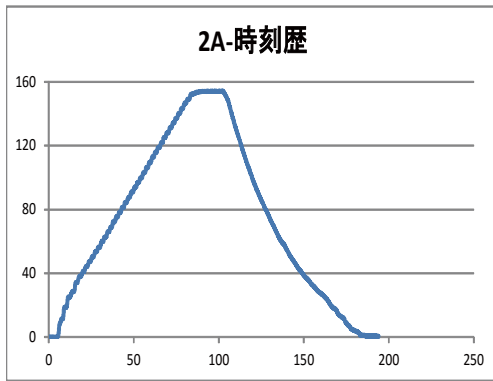
(7) 1 方向加力,対角(+)方向(加力パターン A)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

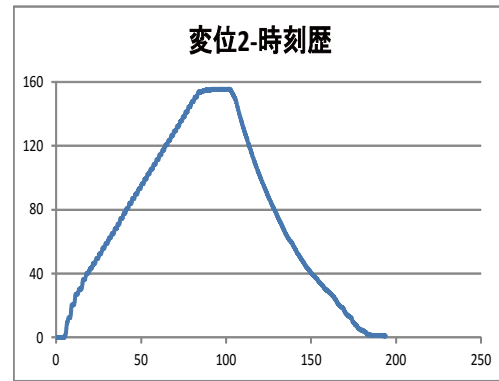


1) 実験結果の例

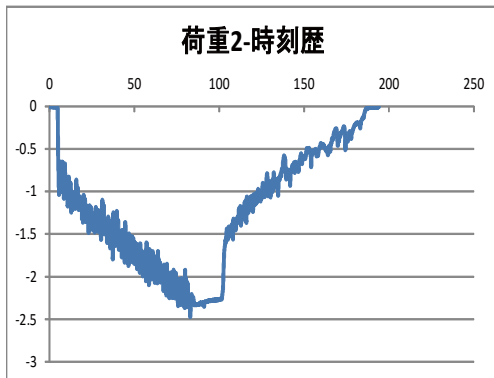
ファイル名 : 20131211_0001



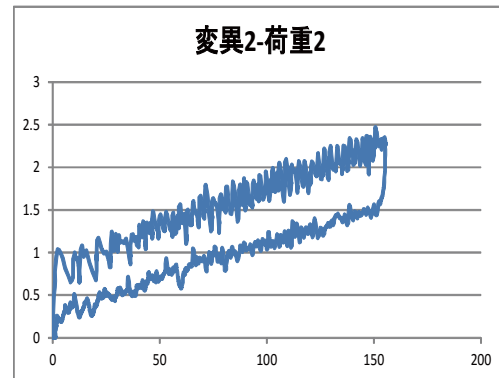
対角(+)方向 2A-時刻歴関係



対角(+)方向 変位 2-時刻歴関係



対角(+)方向 荷重 2-時刻歴関係



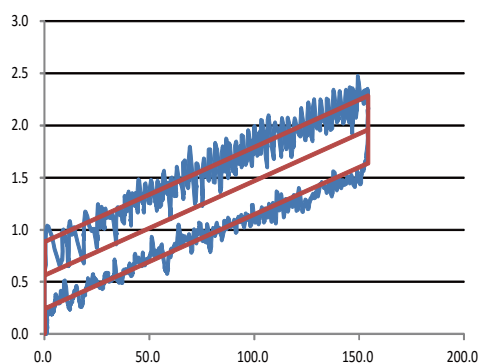
対角(+)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

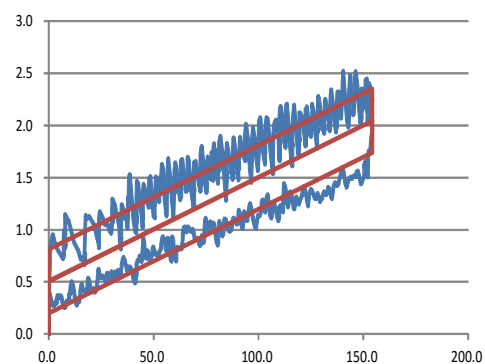
ファイル名 : 20131211_0001

20131211_0002

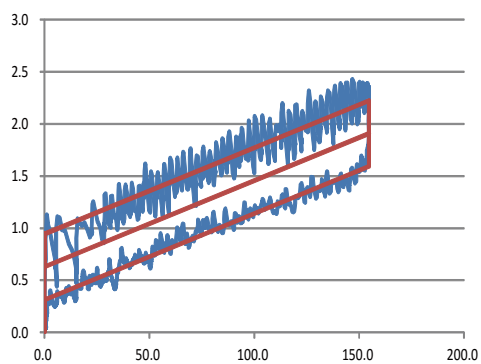
20131211_0003



対角(+)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



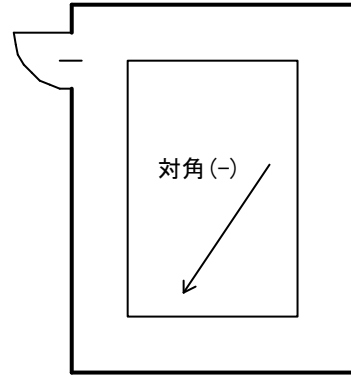
対角(+)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



対角(+)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

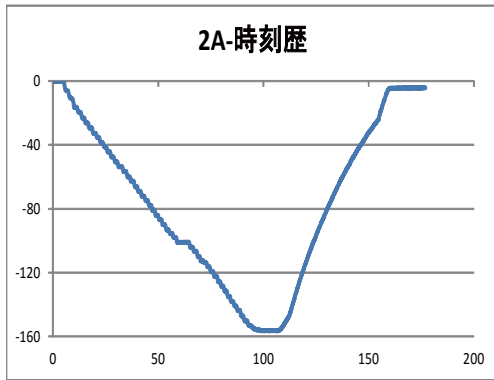
(8) 1 方向加力,対角(-)方向(加力パターン A)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

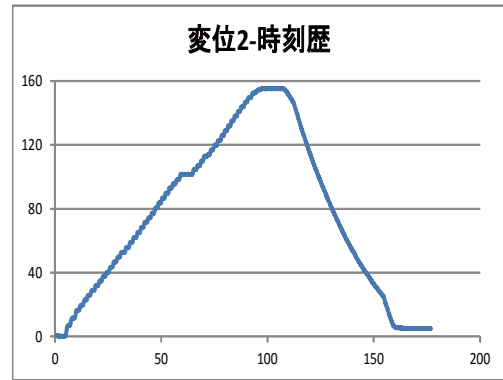


1) 実験結果の例

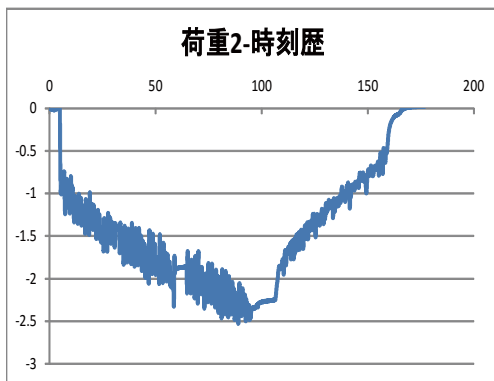
ファイル名 : 20131211_0004



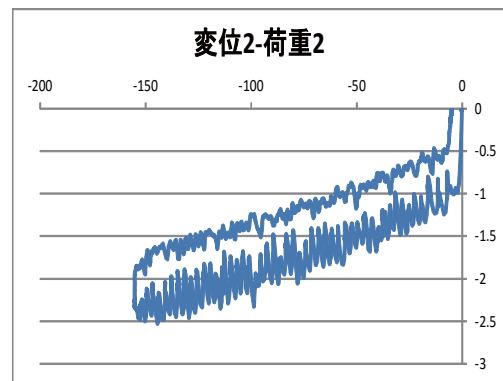
対角(-)方向 2A-時刻歴関係



対角(-)方向 変位 2-時刻歴関係



対角(-)方向 荷重 2-時刻歴関係



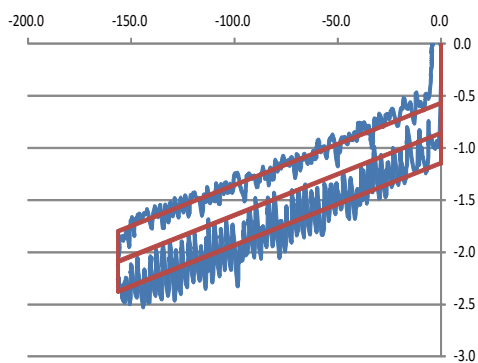
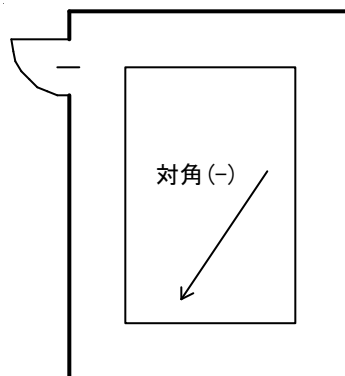
対角(-)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

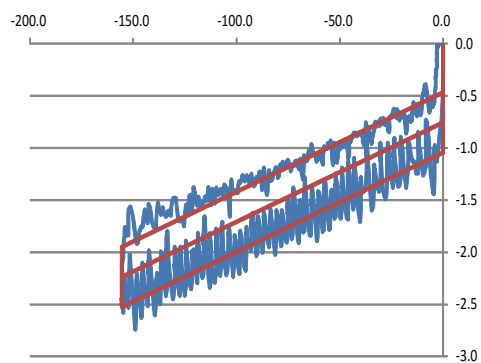
ファイル名 : 20131211_0004

20131211_0005

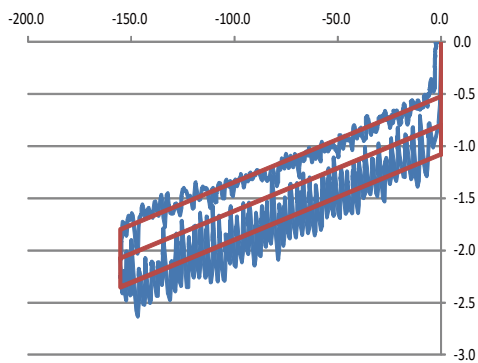
20131211_0006



対角(-)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



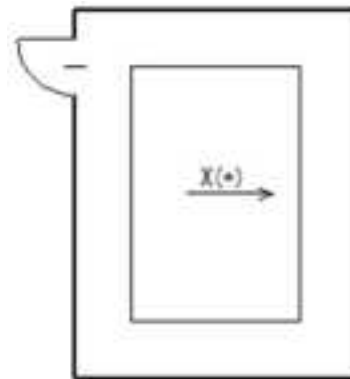
対角(-)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



対角(-)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

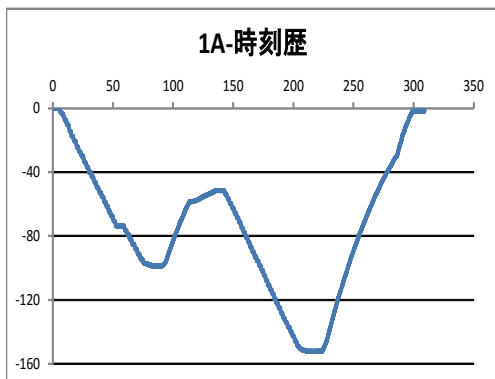
(9) 1 方向加力,X(+)方向(加力パターン B)

荷重 1 : 加力方向の荷重
変位 1A : 免震床の加力方向変位
変位 1 : シリンダヘッドの変位

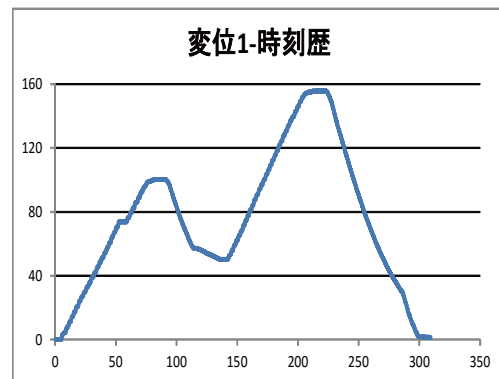


1) 実験結果の例

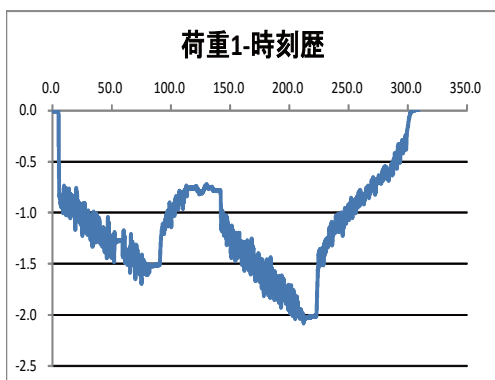
ファイル名 : 20131220_0003



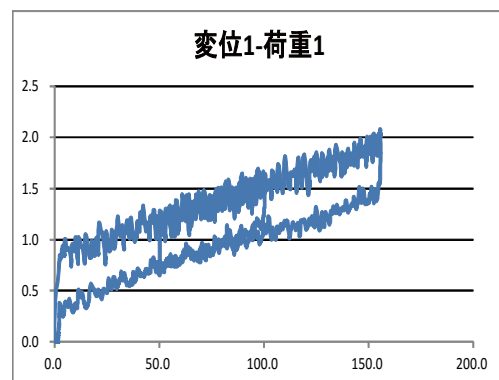
X(+)方向 1A-時刻歴関係



X(+)方向 変位 1-時刻歴関係



X(+)方向 荷重 1-時刻歴関係



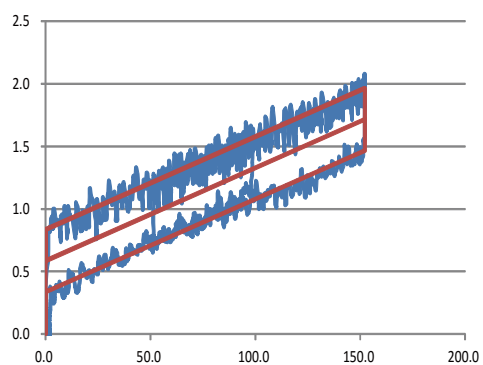
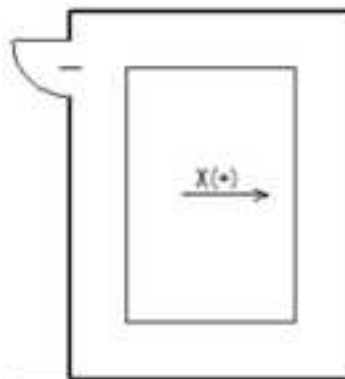
X(+)方向 変位 1-荷重 1 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

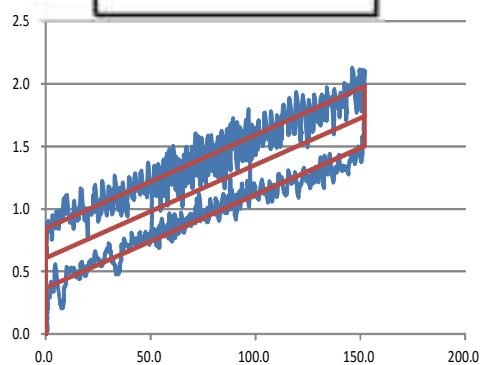
ファイル名 : 20131220_0003

20131220_0004

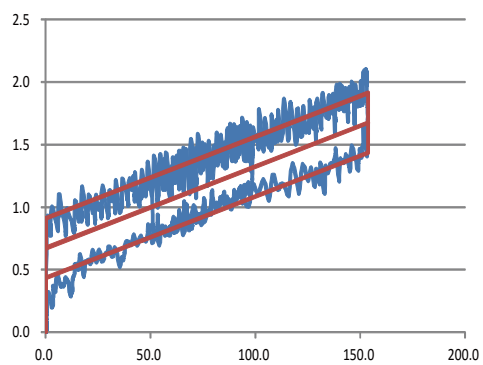
20131220_0005



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 1 回目



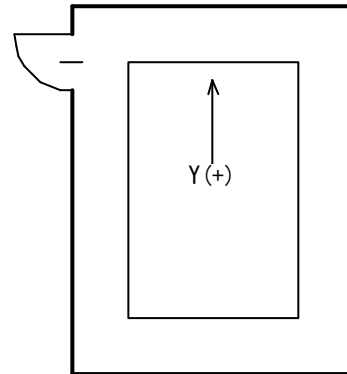
X(+)方向 1A-荷重 1 関係 2 回目



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 2 回目

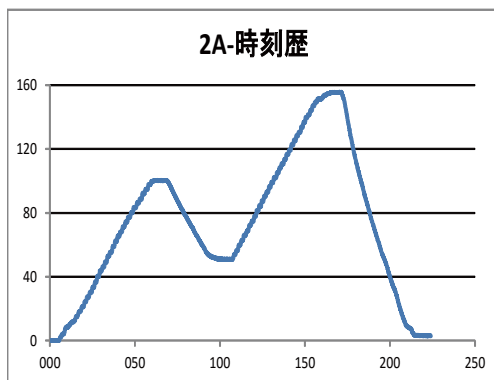
(10) 1 方向加力,Y(+)方向(加力パターン B)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

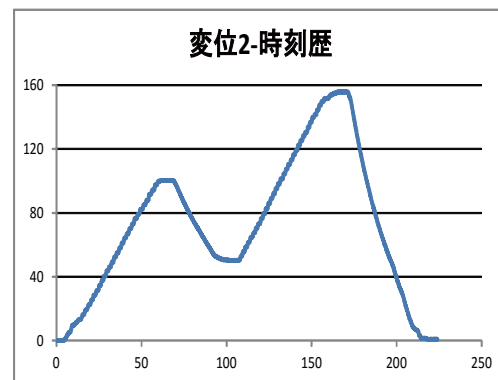


1) 実験結果の例

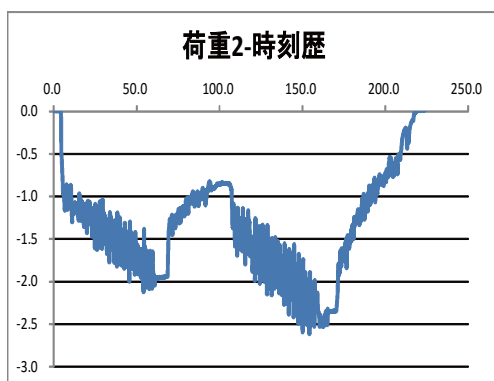
ファイル名 : 20131220_0009



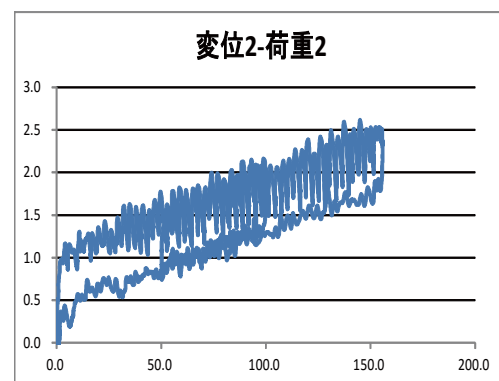
Y(+)方向 2A-時刻歴関係



Y(+)方向 変位 2-時刻歴関係



Y(+)方向 荷重 2-時刻歴関係



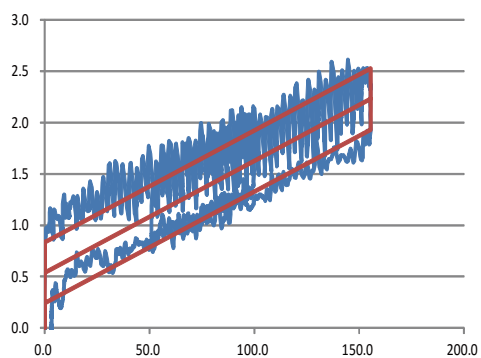
Y(+)方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

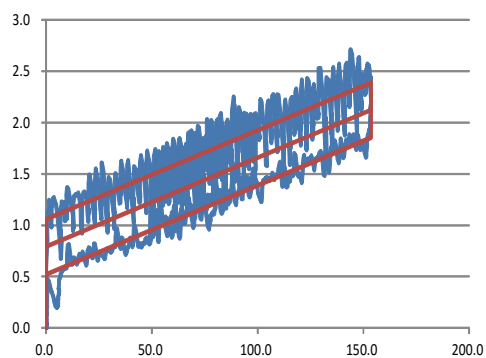
ファイル名 : 20131220_0009

20131220_0010

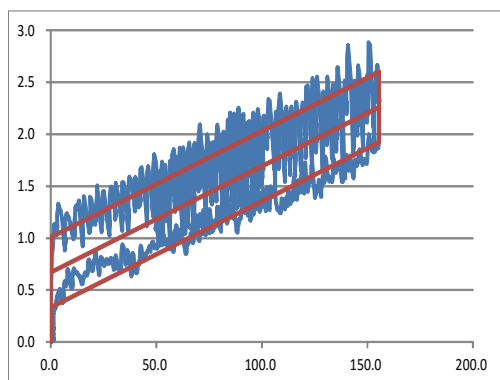
20131220_0011



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



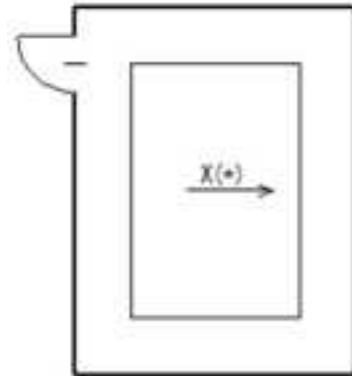
Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

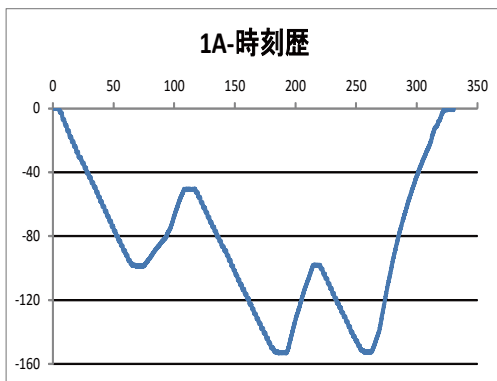
(11) 1方向加力,X(+)方向(加力パターン C)

荷重 1 : 加力方向の荷重
変位 1A : 免震床の加力方向変位
変位 1 : シリンダヘッドの変位

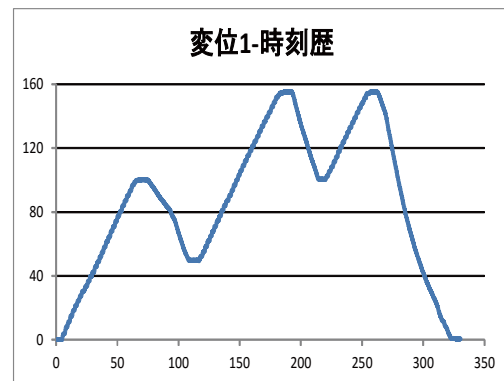


1) 実験結果の例

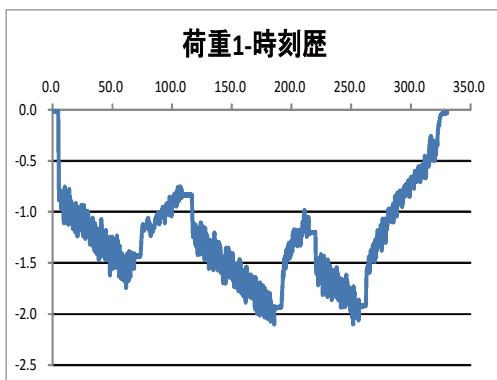
ファイル名 : 20131220_0006



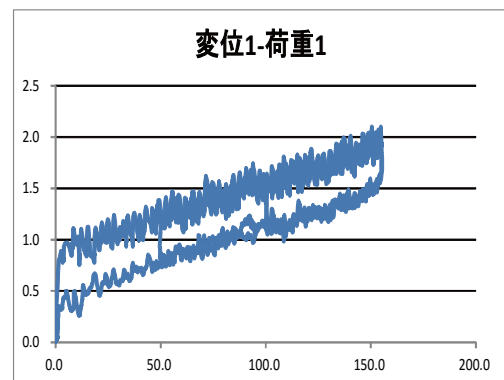
X(+)方向 1A-時刻歴関係



X(+)方向 変位 1-時刻歴関係



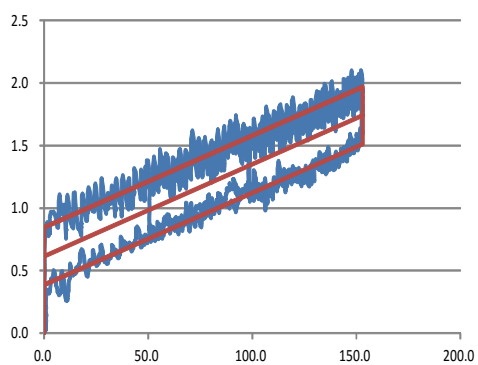
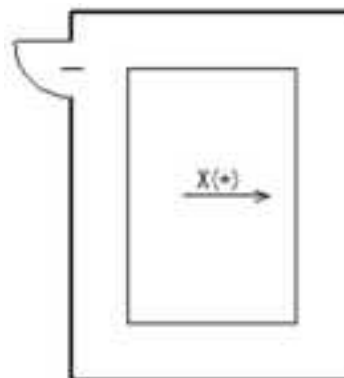
X(+)方向 荷重 1-時刻歴関係



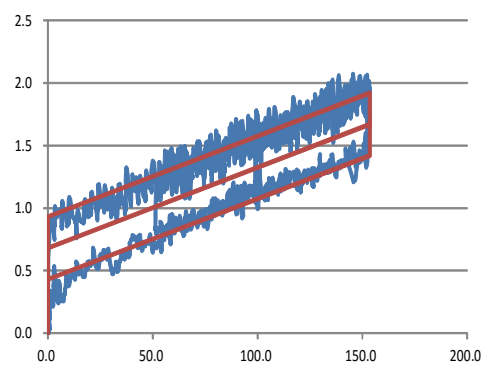
X(+)方向 変位 1-荷重 1 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

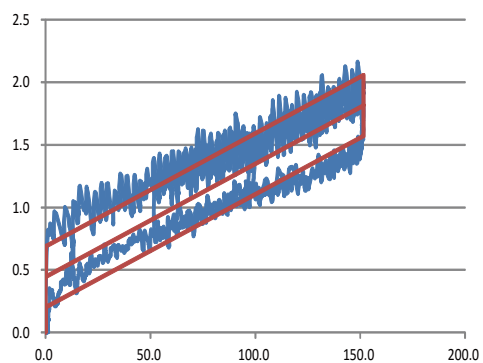
ファイル名 : 20131220_0006
20131220_0007
20131220_0008



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 1 回目



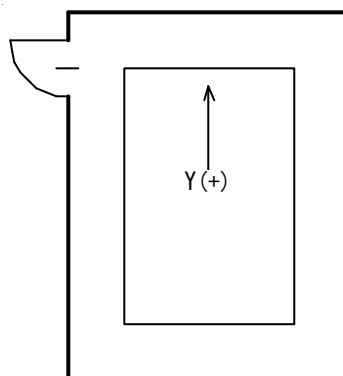
X(+)方向 1A-荷重 1 関係 2 回目



X(+)方向 1A-荷重 1 関係 3 回目

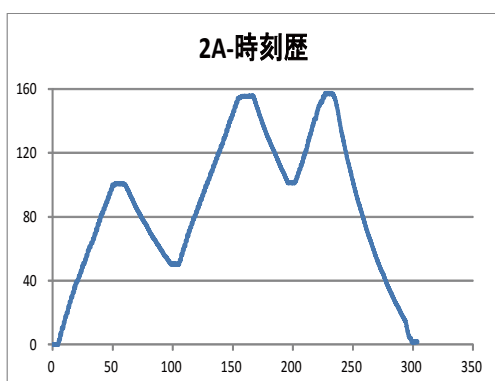
(12) 1 方向加力,Y(+方向(加力パターン C)

荷重 2 : 加力方向の荷重
変位 2A : 免震床の加力方向変位
変位 2 : シリンダヘッドの変位

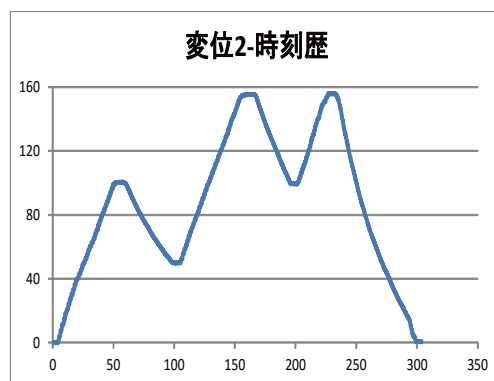


1) 実験結果の例

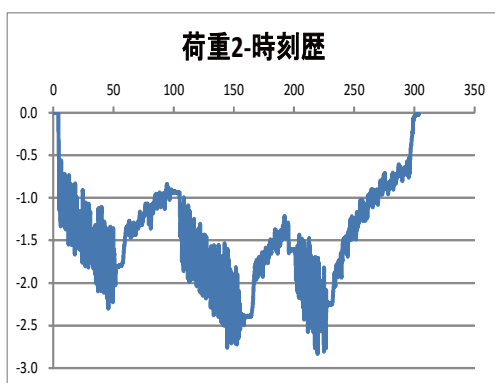
ファイル名 : 20131220_0012



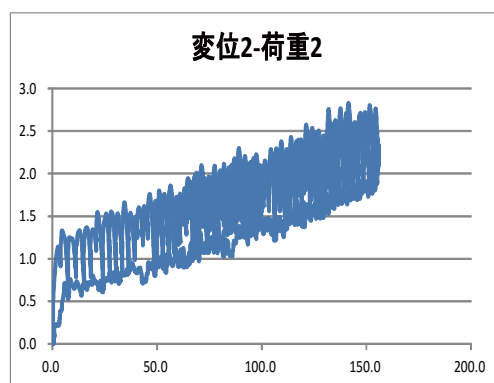
Y(+方向 2A-時刻歴関係



Y(+方向 変位 2-時刻歴関係



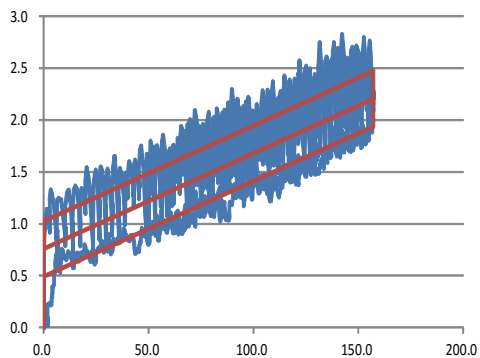
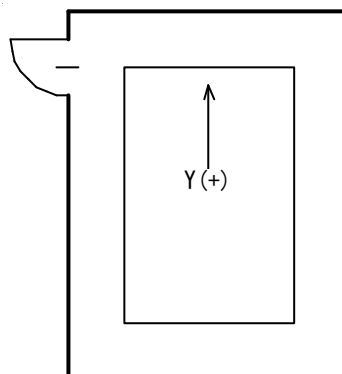
Y(+方向 荷重 2-時刻歴関係



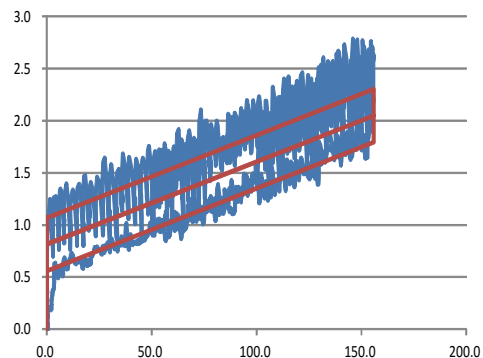
Y(+方向 変位 2-荷重 2 関係

2) 3回の実験による荷重変位関係

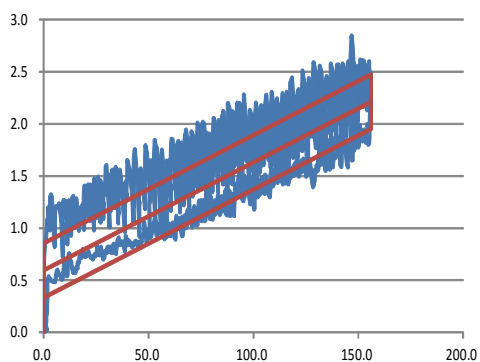
ファイル名 : 20131220_0012
20131220_0013
20131220_0014



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 1 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 2 回目



Y(+)方向 2A-荷重 2 関係 3 回目

(13) 2方向加力 ,加力パターン①(X:Y=1:1)

荷重 1 : X 方向の荷重

荷重 2 : Y 方向の荷重

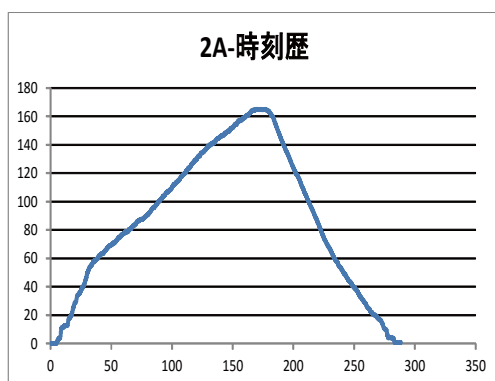
変位 1 : X 方向シリンダヘッドの変位

変位 2 : Y 方向シリンダヘッドの変位

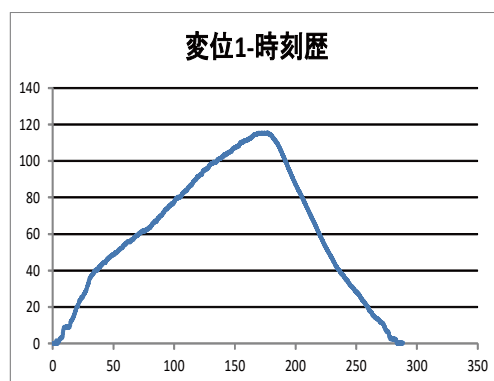
変位 2A : 免震床の変位方向の変位

1)実験結果の例

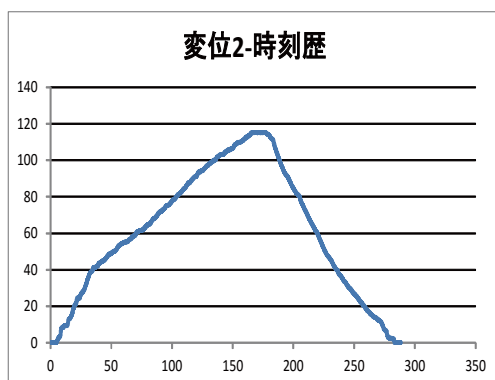
ファイル名 : 20131213_0001



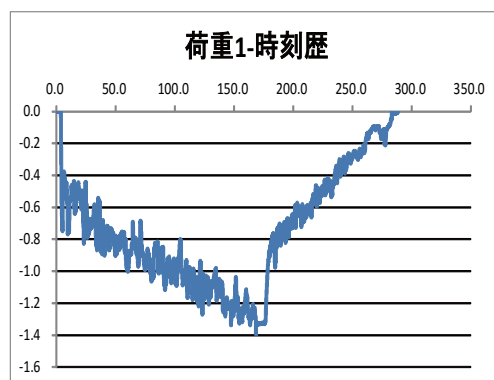
2 方向同時(+) 2A-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-時刻歴関係

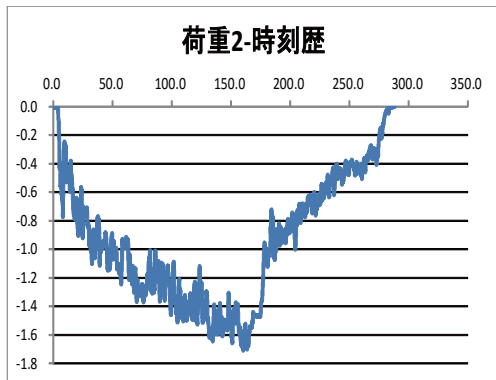


2 方向同時(+) 変位 2-時刻歴関係

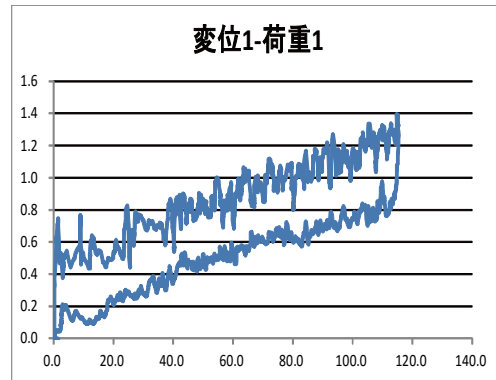


2 方向同時(+) 荷重 1-時刻歴関係

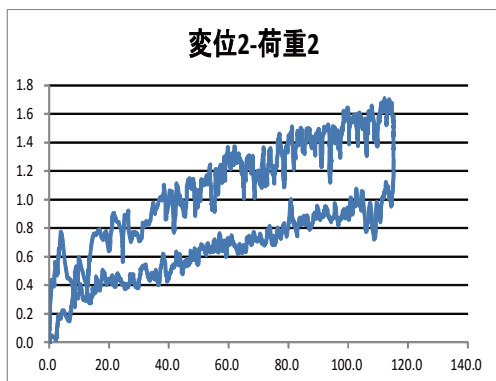
実験結果の例の続き



2 方向同時(+) 荷重 2-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-荷重 1 関係



2 方向同時(+) 変位 2-荷重 2 関係

2) 5回の実験による荷重変位関係

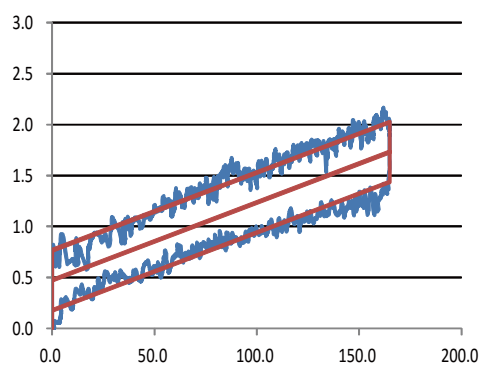
ファイル名 : 20131213_0001

20131213_0002

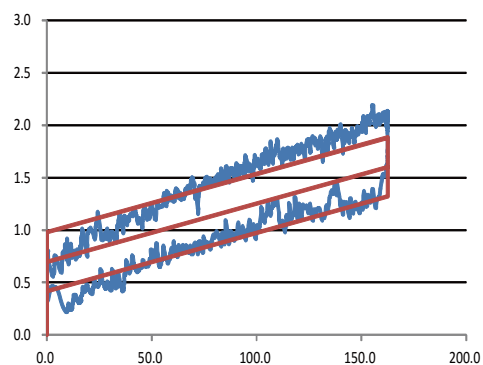
20131213_0003

20131213_0004

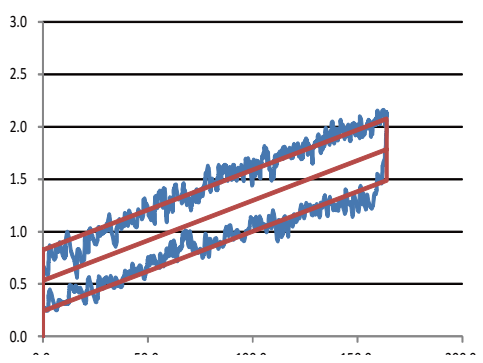
20131213_0005



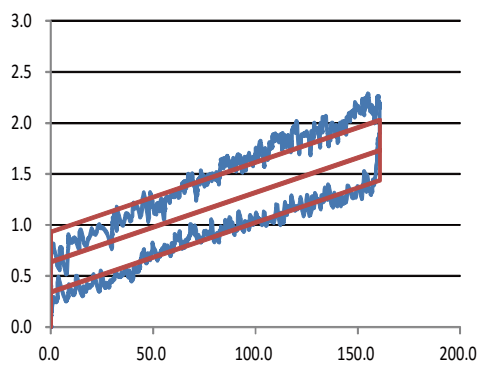
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 1回目



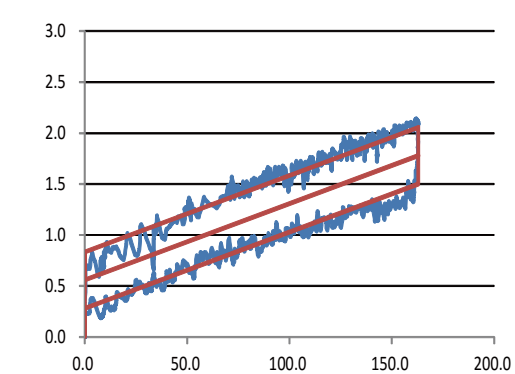
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 2回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 3回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 4回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 5回目

(14) 2方向加力, 加力パターン④(X:Y=1:2))

荷重 1 : X 方向の荷重

荷重 2 : Y 方向の荷重

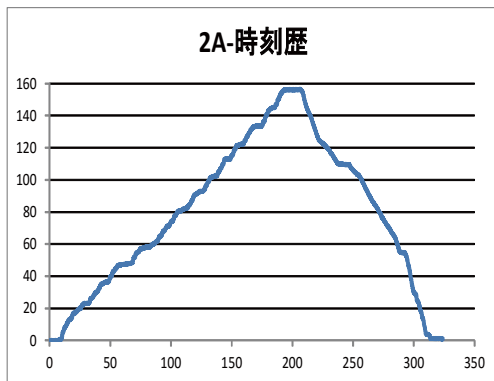
変位 1 : X 方向シリンダヘッドの変位

変位 2 : Y 方向シリンダヘッドの変位

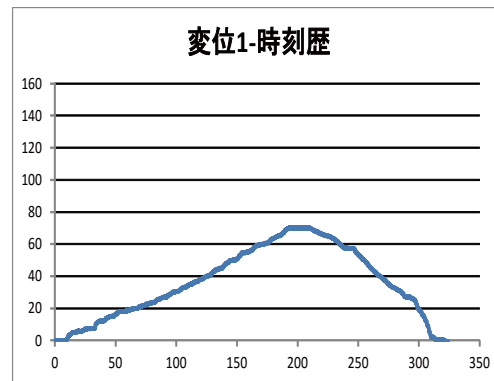
変位 2A : 免震床の変位方向の変位

1)実験結果の例

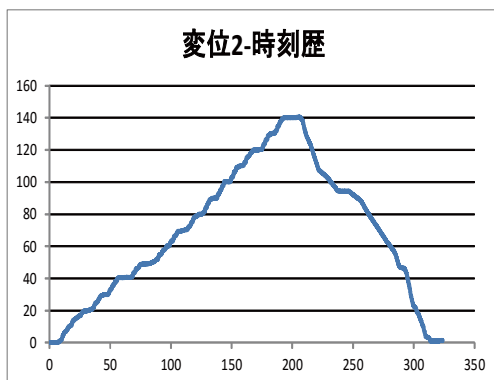
ファイル名 : 20131218_0001



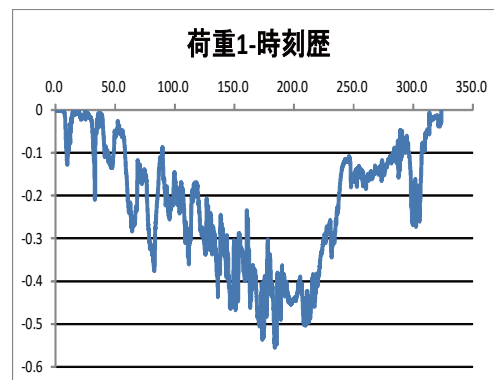
2 方向同時(+) 2A-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-時刻歴関係

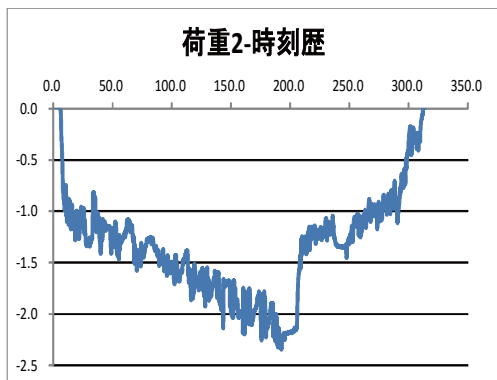


2 方向同時(+) 変位 2-時刻歴関係

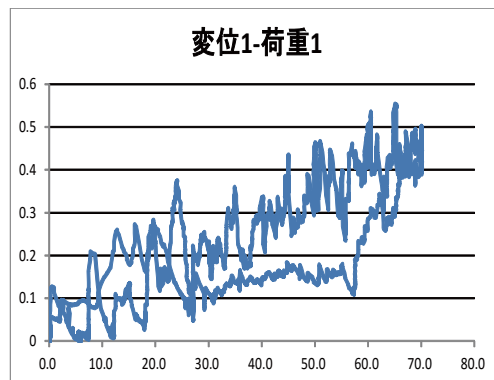


2 方向同時(+) 荷重 1-時刻歴関係

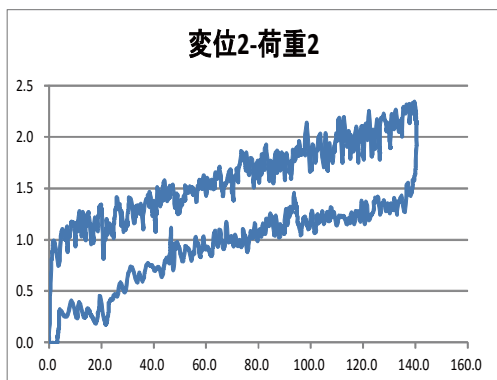
実験結果の例の続き



2 方向同時(+) 荷重 2-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-荷重 1 関係



2 方向同時(+) 変位 2-荷重 2 関係

2) 5回の実験による荷重変位関係

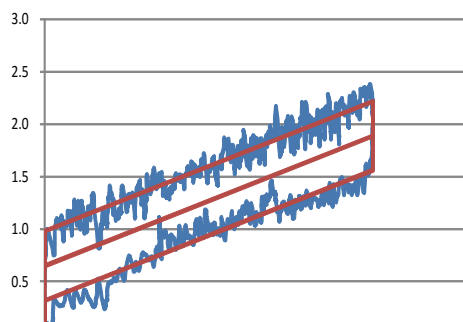
ファイル名 : 20131218_0001

20131218_0002

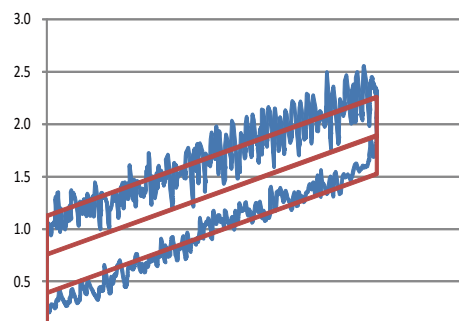
20131218_0003

20131218_0004

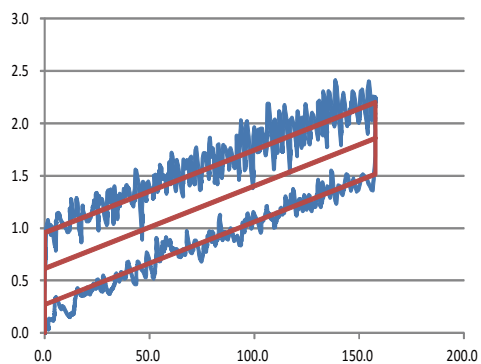
20131218_0005



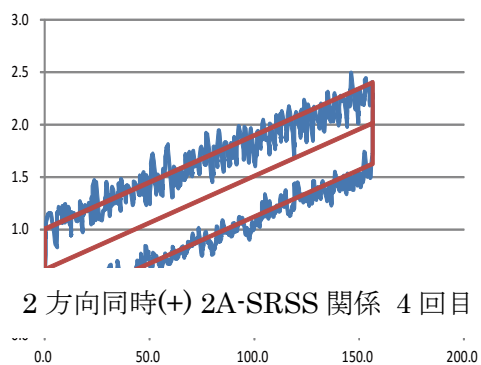
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 1回目



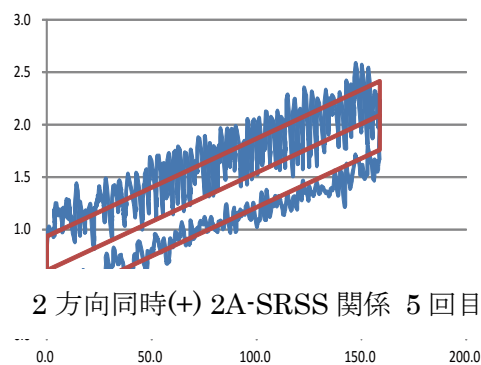
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 2回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 3回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 4回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 5回目

(15) 2方向加力, 加力パターン③(X:Y=2:1)

荷重 1 : X 方向の荷重

荷重 2 : Y 方向の荷重

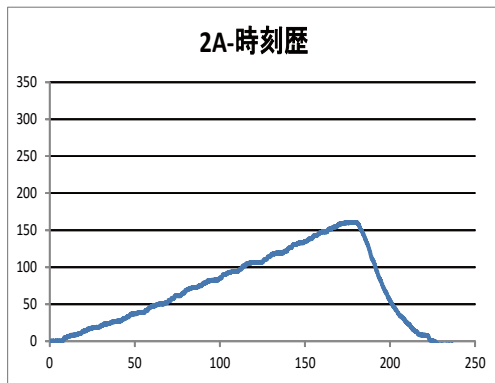
変位 1 : X 方向シリンダヘッドの変位

変位 2 : Y 方向シリンダヘッドの変位

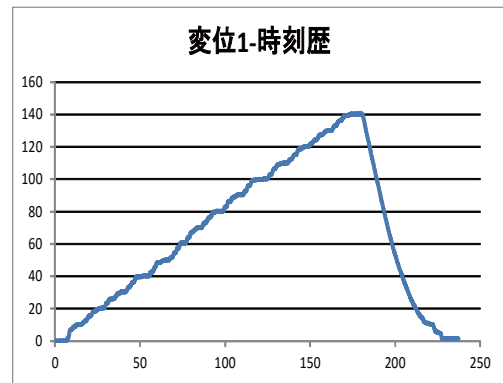
変位 2A : 免震床の変位方向の変位

1)実験結果の例

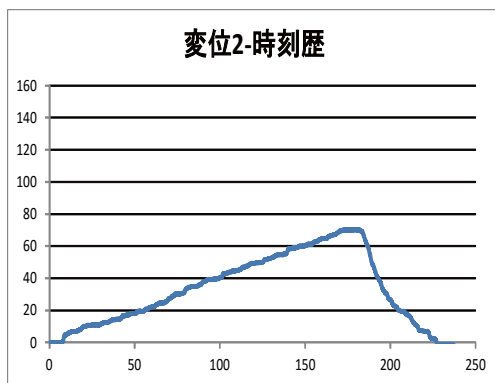
ファイル名 : 20131218_0006



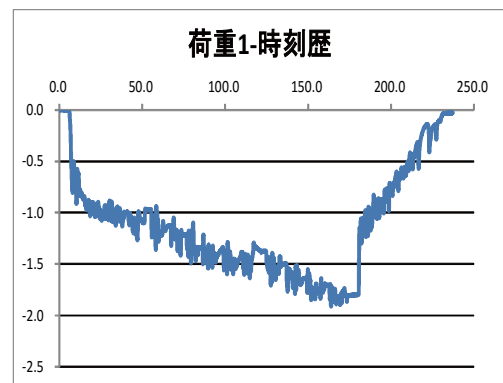
2 方向同時(+) 2A-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-時刻歴関係

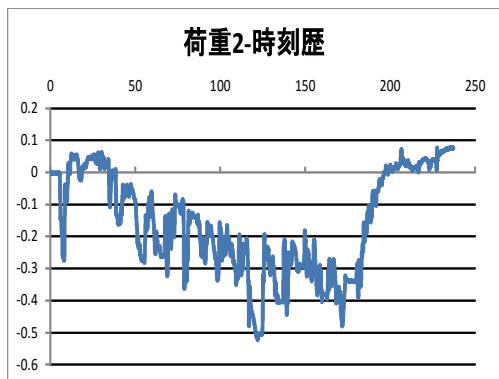


2 方向同時(+) 変位 2-時刻歴関係

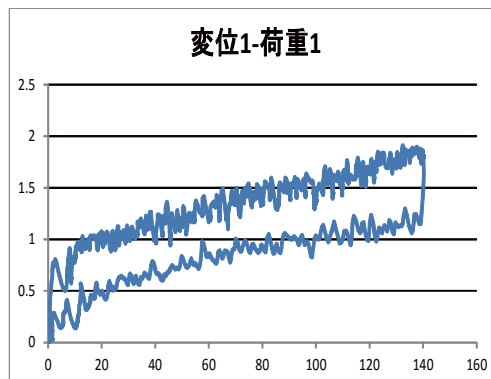


2 方向同時(+) 荷重 1-時刻歴関係

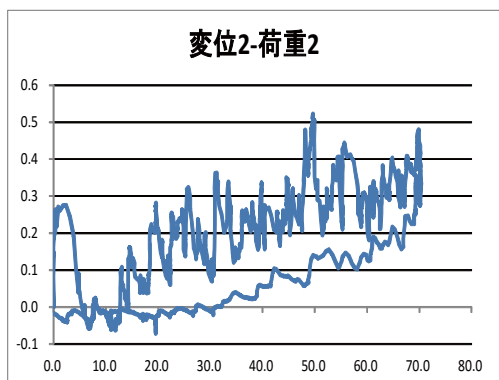
実験結果の例の続き



2 方向同時(+) 荷重 2-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-荷重 1 関係



2 方向同時(+) 変位 2-荷重 2 関係

2) 5回の実験による荷重変位関係

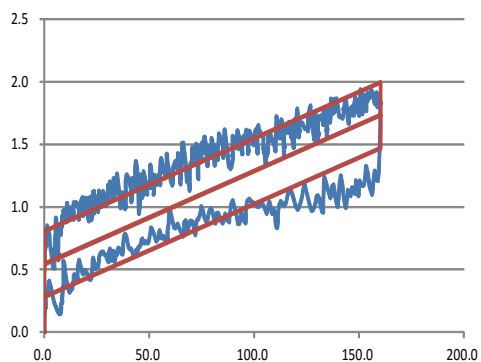
ファイル名 : 20131218_0006

20131218_0007

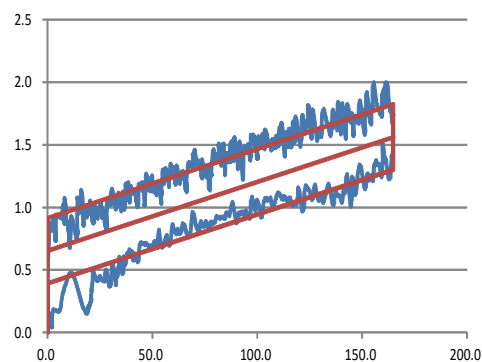
20131218_0008

20131218_0009

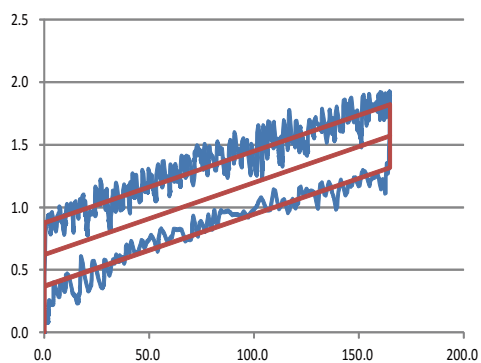
20131218_0010



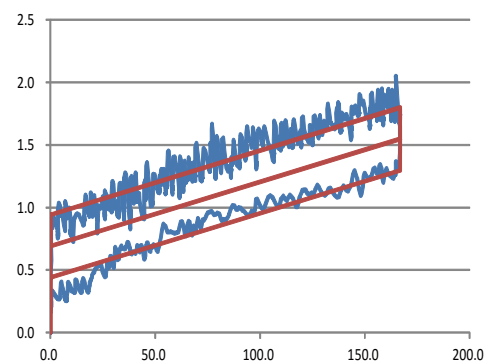
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 1回目



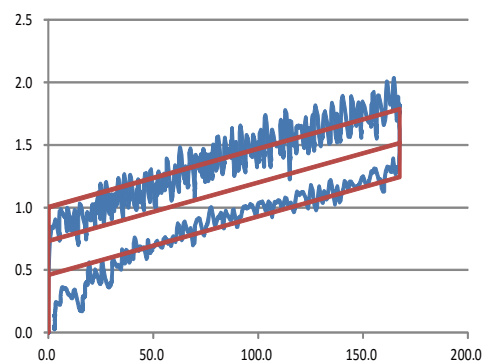
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 2回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 3回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 4回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 5回目

(16) 2方向加力, 加力パターン③(対角))

荷重 1 : X 方向の荷重

荷重 2 : Y 方向の荷重

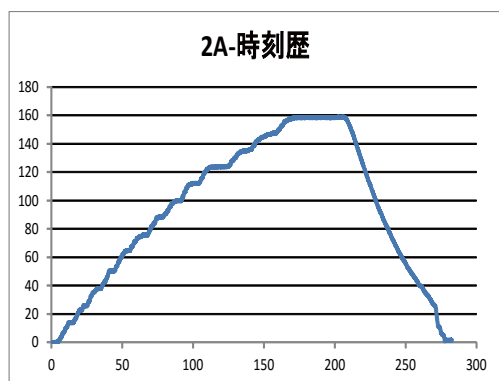
変位 1 : X 方向シリンダヘッドの変位

変位 2 : Y 方向シリンダヘッドの変位

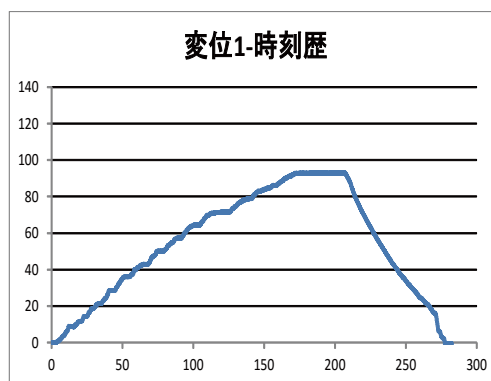
変位 2A : 免震床の変位方向の変位

1)実験結果の例

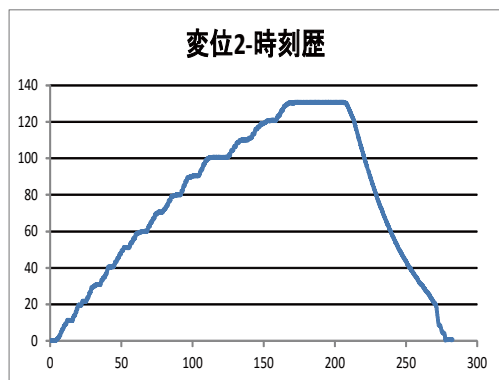
ファイル名 : 20131218_0011



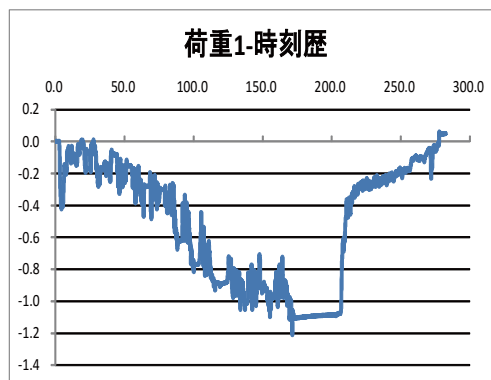
2 方向同時(+) 2A-時刻歴関係



2 方向同時(+) 変位 1-時刻歴関係

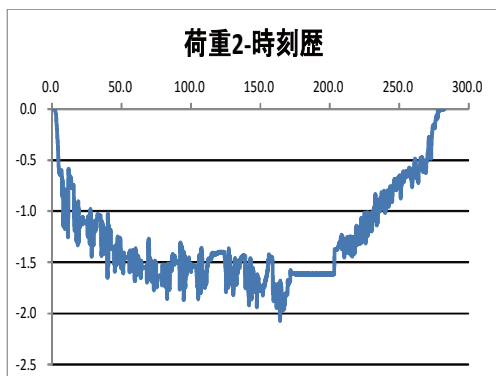


2 方向同時(+) 変位 2-時刻歴関係

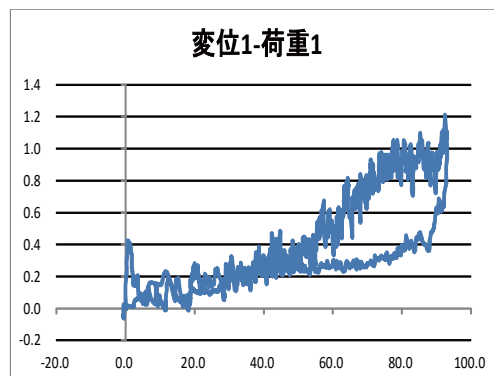


2 方向同時(+) 荷重 1-時刻歴関係

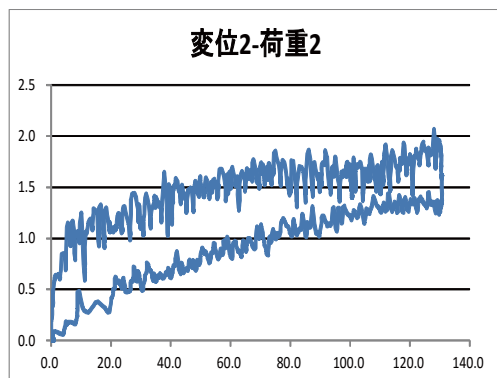
2) 実験結果の例の続き



2 方向同時(+) 荷重 2-時刻歴関係



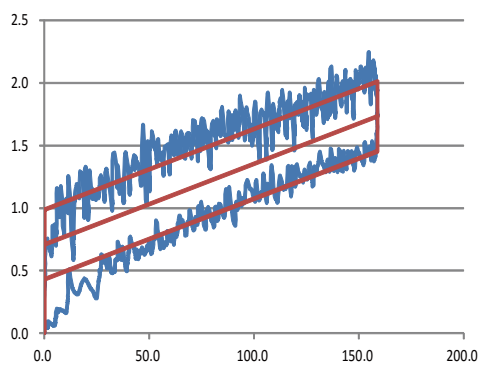
2 方向同時(+) 変位 1-荷重 1 関係



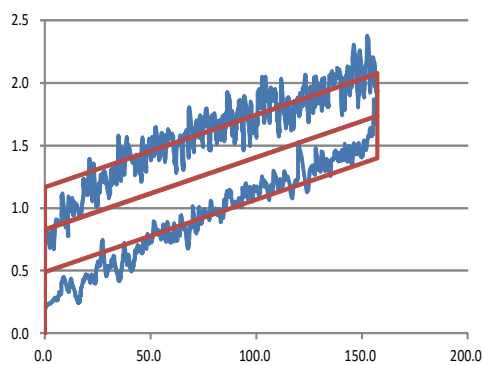
2 方向同時(+) 変位 2-荷重 2 関係

2) 5回の実験による荷重変位関係

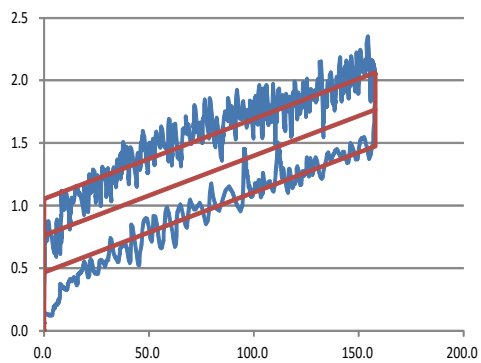
ファイル名 : 20131218_0011
20131218_0012
20131218_0013
20131218_0014
20131218_0015



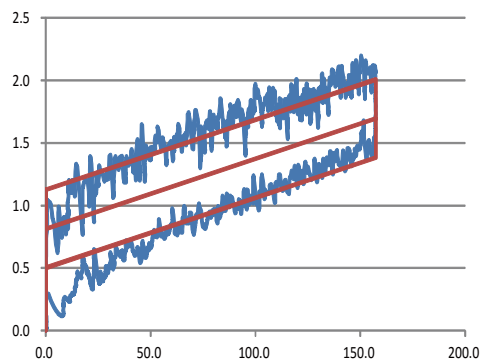
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 1回目



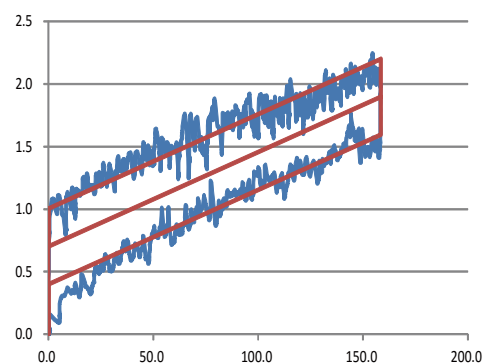
2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 2回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 3回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 4回目



2方向同時(+) 2A-SRSS 関係 5回目

付録-B マルチスプリング(MSS)要素について

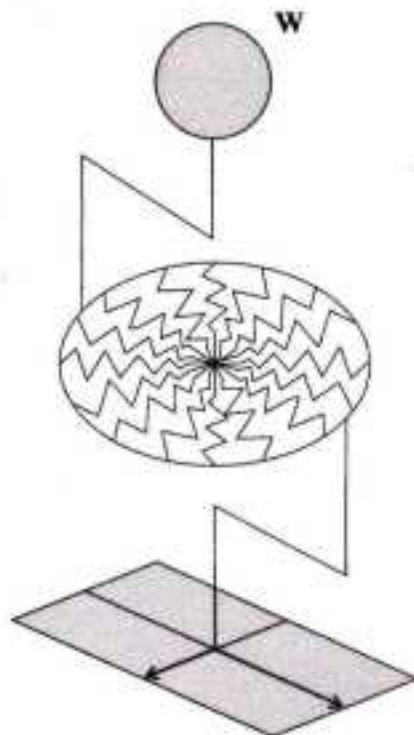
「TDAPIII理論説明書 バージョン 3.04」2012年4月
株式会社アーク情報システム より

4.4 マルチスプリング要素

平面内に多数 (n 本) の非線形バネを等角度に配する要素です。

n 個に離散化した バネはそれぞれ独立した非線形要素として挙動しますが、要素の応力は各バネの応力を基準軸方向に合成したものです。(XY平面に配置した場合はX、Y方向が基準となります。)

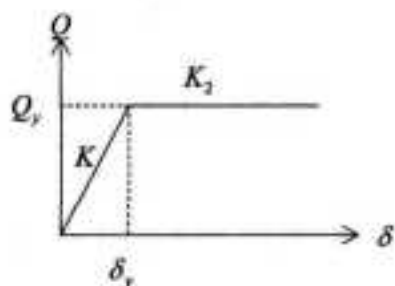
非線形材料特性は1方向の材料特性(全体としての目標値)で入力し、バネの個数により近似的に各バネ値を決定します。



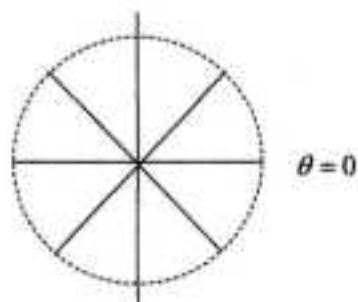
マルチスプリング要素

マルチスプリング要素の各バネ特性の決定方法は以下のとおりです。

ここでは簡単のために、一方向の特性が下図に示すパイリニアモデルの場合を考えます。
バネは $-90^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の間に均一に n 本配置されているものとします。



マルチスプリング要素の一方向特性



マルチスプリングの配置

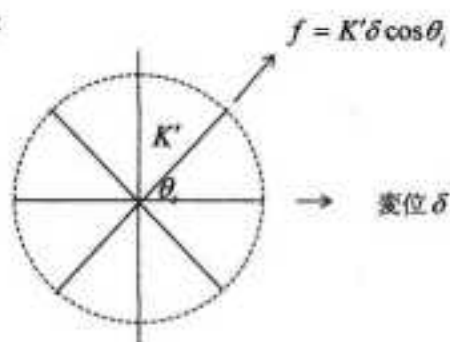
n 本のバネ1本1本の非線形特性は等しくなくてはなりませんから、

初期剛性	K'
降伏変形量	δ_y'
降伏耐力	Q_y'

とします。マルチスプリング要素に対して $\theta = 0^\circ$ 方向に変位 δ を与えた場合の反力はマルチスプリング要素全体としては $K\delta$ となる必要があります。

一方、マルチスプリング要素を構成する各バネについては

変形量が $\delta \cos \theta_i$
反力は $K' \delta \cos \theta_i$



よって $\theta = 0^\circ$ 方向の反力の合計は $\sum K' \delta \cos^2 \theta_i$ となります。これより

$$K\delta = \sum K' \delta \cos^2 \theta_i$$

$$K' = \frac{K}{\sum \cos^2 \theta_i} \quad (1)$$

次に、マルチスプリング要素を構成する各バネの降伏耐力の（ $\theta = 0^\circ$ 方向での）総和が Q_y と等しくなる必要があります。（この条件は、第二剛性 $K_2 = 0$ となる完全弾塑性バネを考えると明白です。）この条件より

$$Q_y = \sum Q_y' \cos \theta_i$$

$$Q_y' = \frac{Q_y}{\sum \cos \theta_i} \quad (2)$$

(1), (2)式より降伏変形量は

$$\delta_y' = \frac{\sum \cos^2 \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \delta_y$$

実際には各バネは $-90^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ではなく、 $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ で配置していますので、以上の関係式をまとめると、

$$K' = K / \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i, \quad \delta_y' = \delta_y \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i / \sum_{i=1}^n \sin \theta_i, \quad Q_y' = Q_y / \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$

ただし、 $\theta_i = i/n\pi$ (rad)、 $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

これらの関係式はパイリニアモデル以外の非線形モデルにもそのまま適用することができます。

【 $n=8$ の場合の例】

$$\sum_{i=1}^8 \sin \theta_i = \sin 0^\circ + \sin 22.5^\circ + \sin 45^\circ + \sin 67.5^\circ + \sin 90^\circ + \sin 112.5^\circ + \sin 135^\circ + \sin 157.5^\circ = 5.027$$

$$\sum_{i=1}^8 (\sin \theta_i)^2 = (\sin 0^\circ)^2 + (\sin 22.5^\circ)^2 + (\sin 45^\circ)^2 + (\sin 67.5^\circ)^2 + (\sin 90^\circ)^2 + (\sin 112.5^\circ)^2 + (\sin 135^\circ)^2 + (\sin 157.5^\circ)^2 = 4$$

よって

$$K' = K/4$$

$$Q_y' = Q_y/5.027$$

$$\delta_y' = 0.7957\delta_y$$

これを図で示すと右のようになります。

